

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Estudo do Comportamento Dielétrico de Celas de Distribuição MT

Marta Abrunhosa Carneiro

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Professor Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

27 de Julho de 2017

Resumo

Neste estudo avaliou-se o comportamento dielétrico de uma cela de 24 kV, disponibilizada pela EFACEC, em situações idênticas a descargas atmosféricas e a sobretensões na rede à frequência industrial. Explorou-se os aspetos construtivos e as normas de aplicação aos ensaios dielétricos. Conclui-se através dos ensaios dielétricos realizados que o comportamento da cela estará em conformidade com as especificações para as quais foi projetada. Foram também retiradas aprendizagens para permitir ao LAT desenvolver e melhorar as competências para realizados ensaios dielétricos a celas de MT.

Abstract

This study evaluated the dielectric behavior of a 24kV switchgear, supplied by the company EFACEC, in a situation which simulates atmospheric discharges and electric overloads in industrial frequency. The components of the switchgear were explored in detail, as well as the norms for application of dielectric tests. Through the dielectric tests performed, it was concluded that the switchgear is in conformity with the norms specifications and ready to be used in the function for which it was designed. The lab in which the tests were performed gained learnings which will allow it to develop and improve its capabilities of conducting dielectric tests to medium voltage switchgears.

Agradecimentos

Este trabalho não teria sido possível efetuar, sem o apoio e o carinho de todas pessoas que estiveram comigo durante todos os momentos que passei durante a execução desta dissertação, às quais eu gostaria de expressar algumas palavras de agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço ao Professor António Machado e Moura pela sua amizade, dedicação e persistência em todo o apoio que me prestou durante a realização deste trabalho.

Ao Tomás Sapage e ao Fábio Branco, que se disponibilizaram logo de imediato toda a sua ajuda para me esclarecer as dúvidas sobre os equipamentos, e que me forneceram dados essenciais para o desenvolvimento deste documento.

À minha família, em especial, aos meus pais, ao meu irmão, e à minha tia, pela compreensão e sacrifícios que fizeram para me auxiliar em todos os momentos que ultrapassei.

Peço também desculpa e agradeço aos meus amigos a minha falta de disponibilidade para as atividades lúdicas durante estes meses.

Marta Carneiro

“If you can dream it, you can do it.”

Walt Disney

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Motivação	2
1.3	Estrutura da Dissertação	3
2	Estado da Arte	5
2.1	Introdução	5
2.2	Enquadramento histórico das celas	5
2.2.1	Celas de manobra com interruptores extraíveis:	6
2.2.2	Celas de manobra com interruptores-seccionadores fixos:	6
2.2.3	Celas de manobra com disjuntor extraível:	6
2.2.4	Celas de manobra com aparelhagem fixa:	7
2.2.5	Celas de manobra com aparelhagem extraível:	7
2.3	Evolução tecnológica dos disjuntores:	7
3	Aspetos construtivos da Cella	9
3.1	Introdução	9
3.2	Disjuntores	10
3.2.1	Disjuntores a vácuo	10
3.2.2	Disjuntores a SF_6	12
3.3	Interruptores-Seccionadores	13
3.4	Encravamentos	13
3.5	Sistemas de Terra	14
3.6	Posto de Transformação Cliente (PTC)	15
3.7	Soluções atuais existentes no mercado	15
4	Documentos normativos referentes aos ensaios dielétricos	21
4.1	Introdução	21
4.2	Condições Normais de Serviço	21
4.3	Ensaio Tipo	23
4.4	Ensaio de Rotina	24
4.5	Ensaio Dielétrico no circuito principal	25
4.5.1	Critérios de aprovação nos ensaios dielétricos	28
5	Atividade Laboratorial	31
5.1	Introdução	31
5.2	Ensaio à onda de choque 1,2/50 μs	34
5.2.1	Ensaio Fase-Fase	38

5.2.2	Ensaio Fase–Terra	45
5.3	Ensaio à frequência industrial	50
5.3.1	Ensaio Fase-Fase	52
5.3.2	Ensaio Fase-Terra	52
5.4	Correção dos valores atmosféricos	53
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	57
6.1	Conclusões	57
6.2	Trabalhos Futuros	58
A	Anexos	61
A.1	Ensaio à Onda de Choque	61
A.2	Ensaio à Frequência Industrial	64

Lista de Figuras

3.1	Ilustração de um disjuntor a vácuo [18]	11
3.2	Encravamento Aberto [21]	14
3.3	Encravamento Terra [21]	14
3.4	Encravamento fechado [21]	14
3.5	Cela dotada de disjuntor isolado a SF6 [22]	16
3.6	Esquema unifilar de uma cela Normafix DB [23]	17
3.7	Esquema unifilar de uma cela Normafix IS [23]	17
3.8	Esquema unifilar de uma cela Normafix CIS [23]	18
3.9	Esquema unifilar de uma cela Normafix DC [23]	18
3.10	Grandezas das características elétricas celas Normafix [23]	18
3.11	Esquema unifilar de uma unidade 2IS+CIS [23]	19
3.12	Esquema unifilar de uma unidade 2IS+DC [23]	19
3.13	Esquema unifilar de uma unidade 2IS+2CIS [23]	20
3.14	Caraterísticas elétricas celas Fluofix [23]	20
4.1	Forma de Onda Tensão de Impulso [24]	27
4.2	Ensaaios com o encravamento Terra [26]	29
4.3	Ensaaios com o encravamento Fechado [26]	29
5.1	Ilustração do equipamento de ensaio	32
5.2	Alavanca para manobrar o encravamento da cela [21]	32
5.3	Aspecto constructivo do equipamento de ensaio [21]	33
5.4	Ilustração do equipamento em ensaio com o encravamento aberto	33
5.5	Fotografia da chapa de características do equipamento em ensaio.	34
5.6	Ilustração dos equipamentos para elaborar o ensaio à onda choque	35
5.7	Resistências de carga	36
5.8	Representa as resistências adicionais à resistência de frente	37
5.9	Ilustração da Onda completa registada no pré-ensaio Ensaio Fase-Fase com polaridade negativa	37
5.10	Ilustração do circuito interligado com a fase de entrada L1	38
5.11	Esquema da ligação para aplicação da tensão à fase L1	39
5.12	Representação das fases de saída L2 e L3 ligadas ao barramento terra	39
5.13	Esquema da ligação para aplicação da tensão à fase L2	41
5.14	Registo da onda de tensão à polaridade positiva	41
5.15	Arco elétrico entre a fase L2 e a fase L3	44
5.16	Registo da onda de tensão durante a descarga	45
5.17	Procedimento para Ensaio Fase-Fase	45
5.18	Representação ilustrativa das 3 fases de saída curto-circuitadas	46

5.19	Procedimento para Ensaio Fase-Terra	51
5.20	Fotografia que ilustra o circuito efetuado para os ensaios à frequência industrial .	51
5.21	Procedimento para Ensaio à Frequência Industrial Fase-Fase	53
5.22	Procedimento para Ensaio à Frequência Industrial Fase-Fase	54
A.1	Ilustração do Retificador LGR 100-15 em ligação com o Gerador de Marx	62
A.2	Ilustração do Gerador de choque de Marx	63
A.3	Ilustração do Divisor de tensão de impulso – CR1200kV:	64
A.4	Fotografia da unidade de controlo GC222 (lado esquerdo) e do sistema DIAS (lado direito da imagem)	65
A.5	Fotografia do transformador de Alta Tensão 600kV	66
A.6	Fotografia do Divisor de Tensão CW 600	67
A.7	Fotografia do Regulador Elevador	68
A.8	Fotografia da unidade de controlo e medida	68

Lista de Tabelas

4.1	Descrição geral dos ensaios tipos a executar numa cela	23
4.2	Condições gerais para ensaios dielétricos	28
5.1	Dimensões que o equipamento de ensaio possui	34
5.2	Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L1	40
5.3	Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L2	40
5.4	Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L3	42
5.5	Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade positiva quando se aplica a tensão à fase L1	42
5.6	Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade positiva quando se aplica a tensão à fase L2	43
5.7	Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade positiva quando se aplica a tensão à fase L3	43
5.8	Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L1	47
5.9	Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L2	48
5.10	Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L3	48
5.11	Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L1	49
5.12	Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L2	49
5.13	Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L3	50
A.1	Designação dos equipamentos utilizados em cada um dos ensaios	61

Abreviaturas e Símbolos

AIS	<i>Air Insulated switchgear</i>
DIAS	<i>Digital Analyser System 730</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GIS	<i>Gas Insulated switchgear</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
LAT	Laboratório de Alta Tensão
MT	Média Tensão
PT	Posto de Transformação
PTC	Postos de Transformação de cliente
PTD	Postos de Transformação Públicos
PVO	Pequeno Volume de óleo
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SIS	<i>Solid Insulated switchgear</i>
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
U_o	Tensão normalizada
U	Tensão corrigida às condições atmosféricas
K_t	Fator de correção
δ	Densidade do ar
K_1	Fator de correção da densidade do ar
K_2	Fator de correção da humidade
K_t	Fator de correção atmosférica
h	Humidade absoluta

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Ao longo das últimas décadas a tecnologia tem evoluído bastante, e a dependência da energia elétrica é cada vez maior. Atualmente é extremamente difícil viver sem energia elétrica, pois grande parte dos equipamentos atuais são alimentados por eletricidade e a interrupção desta, mesmo que por breves instantes, tem um impacto muito importante na vida quotidiana. A existência de falhas na rede de distribuição tem enormes repercussões económicas, podendo até levar à perda de vidas.

Deste modo, desde o final do século XIX foram desenvolvidos dispositivos que proporcionassem a continuidade do fornecimento da energia elétrica, e que assegurassem segurança das pessoas. Estes equipamentos devem ser dotados de características adequadas que permitam assegurar o corte de energia em casos de falha ou sobrecarga e garantir que não há riscos para a segurança das pessoas. Para que tal seja possível, estes aparelhos devem ser dotados de aparelhos de corte e de aparelhos de manobra, que sejam capazes de controlar as tensões existentes na altura. No entanto, estes dispositivos eram inicialmente muito arcaicos e também sofreram uma evolução tecnológica para acompanhar a crescente procura por energia. Estes aparelhos convergiram desta forma para que fossem agrupados e localizados em quadros modulares, ou seja, as celas.

As celas são quadros modulares de tamanho reduzido, constituídas por fusíveis, disjuntores, interruptores-seccionadores e sistemas de terra e são empregues em redes de distribuição nos postos de transformação e em instalações industriais [1].

Uma vez que as celas são quadros modulares de tamanho reduzido e são constituídas por aparelhos de corte e aparelhos de manobra, quando inseridas na rede permitem assegurar as seguintes funções [2]:

- Em caso de curto-circuitos ou sobrecargas na rede os aparelhos de corte existentes nas celas devem ser capazes de detetar estas falhas e garantir o isolamento de equipamentos;
- De forma a efetuar manutenções ou reparações na rede, os aparelhos de manobra existentes nas celas devem permitir aos operadores da rede dividir a rede em secções;
- Os aparelhos de manobra devem garantir também a segurança dos operadores;

Devido aos aparelhos existentes nas celas, a inserção de celas na rede é deste modo indispensável para auxiliar na deteção de falhas na rede e garantir a continuidade da alimentação das cargas.

As celas podem ser classificadas de acordo com três diferentes níveis de tensão: baixa tensão, média tensão e alta tensão. Neste documento será avaliada uma determinada cela para ser inserida em redes de distribuição em média tensão.

1.2 Motivação

É indispensável avaliar se os aparelhos existentes nas celas estão a operar corretamente, caso contrário os equipamentos ligados à rede podem ser percorridos por correntes extremamente elevadas, e isto pode levar a danos irremediáveis. É imprescindível verificar previamente se a cela está em condições de ser inserida na rede.

Existem normas internacionais publicadas pelo IEC (International Electrotechnical Commission), que será abordado em capítulo próprio, capítulo 4, onde se especificam quais os ensaios fundamentais e quais os requisitos a que a cela deve obedecer para se certificar que a mesma desempenhará corretamente todas as suas funcionalidades.

Estes ensaios devem ser efetuados pelos fabricantes ou em locais próprios para o efeito. Uma vez que o Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) apresenta as condições necessárias para a realização dos ensaios, foi disponibilizada pela EFACEC uma cela Normafix – 24kV, com a finalidade de permitir ao LAT desenvolver e melhorar estas competências e os procedimentos nestes ensaios.

Desta forma, o desenvolvimento desta dissertação tem como principal objetivo efetuar os ensaios especificados nas normas, e validar se a cela que foi fornecida ao LAT está apta para ser colocada em serviço.

Até ao momento, o LAT estava muito direcionado para efetuar apenas ensaios a isoladores, o que só permitia realizar ensaios com tensões. Com a disponibilização da aparelhagem de média tensão, a cela em questão, o LAT poderá futuramente executar ensaios envolvendo correntes, de

forma a verificar se o equipamento em ensaio está em condições para suportar também ensaios de aquecimento.

Com base nesta dissertação, o LAT aprofundará o conhecimento dos procedimentos operacionais necessários para a realização dos ensaios à onda de choque e à frequência industrial.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos. Os próximos pontos enumeram um sucinto resumo do que foi abordado em cada um dos capítulos:

Capítulo 1: Introdução - detalha brevemente que funções as celas desempenham na rede de distribuição de MT, os objetivos pelos quais este trabalho foi desenvolvido e as motivações que levaram o LAT a realizar esta dissertação.

Capítulo 2: Estado da Arte - a evolução da tecnologia das celas ao longo do último século é descrita neste capítulo.

Capítulo 3: Aspectos construtivos das celas - detalha-se mais exaustivamente neste capítulo os aspectos construtivos de uma cela, com ênfase na descrição tecnológica dos disjuntores utilizados atualmente e nas soluções disponibilizadas no mercado pela EFACEC.

Capítulo 4: Documentos normativos referentes aos ensaios dielétricos - Previamente à realização laboratorial é indispensável elaborar um estudo às normas definidas pelo IEC que estabelece quais as diretivas de procedimento para a efetuar ensaios dielétricos. A abordagem e a descrição destas normas para os ensaios dielétricos é enumerada neste capítulo.

Capítulo 5: Atividade Laboratorial - neste capítulo é abordado o aspecto construtivo do equipamento de ensaio, o seu mecanismo de operação e as suas grandezas elétricas. Descreve também qual o objetivo de cada um dos ensaios dielétricos que foram efetuados na atividade laboratorial, o procedimento que foi aplicado em cada um deles, e os resultados.

Capítulo 6: Conclusões e trabalhos futuros - este capítulo descreve as conclusões do estudo e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

2.1 Introdução

Nas últimas décadas a tecnologia tem sofrido um aumento acrescido de investigações de forma a melhorar as soluções já existentes no mercado, onde as celas não são exceção ao enorme desenvolvimento tecnológico do último século. Neste capítulo será efetuado um enquadramento da evolução tecnológica que as celas de média tensão têm vindo a sofrer ao longo destes últimos anos.

Tal como já foi referido anteriormente, desde do início da história da eletricidade que houve necessidade de introduzir aparelhos de corte e de manobra para controlar a rede. Originalmente estes equipamentos eram fixados à parede, onde mais tarde foram agrupados e montados em painéis de madeira. Contudo, por uma questão de riscos de incêndio, estes painéis também foram substituídos por ardósia ou mármore, de acordo com [3].

2.2 Enquadramento histórico das celas

Com a evolução tecnológica e por questões de segurança, surgem desta forma normas de instalação VDE 0100, que definem que os equipamentos devem estar compartimentados e onde surgem as primeiras celas de média tensão. Contudo, estas celas eram inicialmente muito primitivas e estavam apenas direcionadas para as suas capacidades técnicas. Quase não havia preocupações com a segurança, as partes em tensão não estavam protegidas e tanto a parte da frente como a parte de trás eram facilmente acessíveis. As partes ativas estavam apenas isoladas por uma rede e eram designadas por celas abertas. Eram celas extremamente volumosas, necessitavam de manutenções recorrentes e as questões ambientais não eram relevantes.

No sentido de melhorar as propriedades das celas, a Pehla – Sociedade para Ensaio Elétricos de Grande Potência – conforme referenciado em [4], define pela primeira vez recomendações para se efetuar corretamente ensaios com o objetivo de avaliar o comportamento ao arco elétrico. Uma

das principais preocupações para realizar corretamente os ensaios era a proteção das pessoas que estavam envolvidas no serviço. Desta forma as celas evoluem para que os aparelhos de corte e de manobra sejam compartimentados e blindados por uma porta de chapa.

Segundo [4], estes foram os tipos de celas mais relevantes durante o último século:

- Celas de manobra com interruptores extraíveis;
- Celas de manobra com interruptores-seccionadores fixos;
- Celas de manobra com disjuntor extraível;
- Celas de manobra com aparelhagem fixa;
- Celas de manobra com aparelhagem extraível;

2.2.1 Celas de manobra com interruptores extraíveis:

Os interruptores existentes neste tipo de celas são inseridos num carro extraível dotado de um encravamento adequado à aparelhagem. Uma vez que estes dispositivos não atuam automaticamente face às sobrecargas, este pode ser ligado a fusíveis de maneira a proteger o circuito. A localização dos fusíveis também se situa no carro extraível e este deve estar em posição de seccionamento em caso de ser necessário substituir os fusíveis. Este tipo de celas podem ser montadas em filas e as que são equipadas com fusíveis são normalmente aplicadas às saídas dos transformadores.

2.2.2 Celas de manobra com interruptores-seccionadores fixos:

Em comparação com as celas de interruptores extraíveis este tipo de celas permite que as dimensões sejam mais reduzidas particularmente na largura da cela. A aplicação destas celas será vantajosa para alimentar postos de transformação em betão pré-fabricado e em pequenas cabines de manobra. Estes postos de transformação situam-se em instalação de exploração em anel.

2.2.3 Celas de manobra com disjuntor extraível:

De forma a auxiliar na deteção das correntes defeito, por vezes é indispensável a inserção de um disjuntor nos postos de transformação, em ligação direta à linha de distribuição. As celas de disjuntor extraível podem ser interligadas em fila com as celas de interruptores-seccionadores fixos.

2.2.4 Celas de manobra com aparelhagem fixa:

Conforme os requisitos da exploração em que as celas devem ser inseridas, estas podem ser classificadas como abertas ou blindadas e sendo equipadas com barramentos simples ou duplos. Este tipo de celas podem ser inseridas em postos de transformação ou em indústrias. Para além dos barramentos fixos, são providas de isoladores de suporte ou de travessia e as suas partes em tensão ou acessíveis estão devidamente protegidas para contactos diretos ou contactos acidentais. Permitem ser introduzidas em redes com potências de curto-circuito de 500MVA, e suportam correntes nominais de 2500 A. Os interruptores-seccionadores e seccionadores podem ser manobrados por uma vara, enquanto os disjuntores são operados por um comando manual ou por disparo automático.

2.2.5 Celas de manobra com aparelhagem extraível:

Neste tipo de celas existe um carro extraível, carro esse que é onde se localiza o disjuntor, e que quando está em posição de seccionamento a distância entre os contactos fixos e móveis é suficiente de forma a permitir-lhes cumprir as diretivas VDE estabelecidas. São apropriadas para instalações interiores, e são dotadas, tal como as de aparelhagem fixas, de barramentos simples ou de barramentos duplos. Os disjuntores extraíveis montados no carro são caracterizados como de pequenos volumes de óleo - PGO.

2.3 Evolução tecnológica dos disjuntores:

Inicialmente as celas utilizavam o disjuntor a ar comprimido como meio dielétrico para extinguir o arco elétrico, mas à medida que as tensões aumentavam tornava-se extremamente difícil manter as capacidades de isolamento. Para que este disjuntor fosse viável e eficiente, o ar deveria ser o mais puro possível e muito pouco húmido. No caso de intrusão de água, o comportamento do dielétrico ficaria comprometido e não seria possível extinguir o arco. Estes dispositivos eram bastante volumosos e de forma a manter as características propícias do ar purificado, as centrais onde eram inseridas as celas eram dotadas de filtros de ar, desumidificadores e compressores.

Posteriormente, na década de 1920, desenvolveu-se a tecnologia para o disjuntor isolado a óleo, tendo sido bastante empregue até 1970 [5], [6] e [7]. Com o aparecimento deste disjuntor, em comparação com as celas que empregam o ar como meio de extinção do arco, conseguiu-se que as celas fossem introduzidas em redes com tensões mais elevadas. Possibilitaram também uma redução significativa às dimensões da cela. No entanto, esta solução ainda não era completamente viável em termos de segurança e manutenção. Quando o arco é extinto por este disjuntor, pequenas impurezas vão se acumulando no óleo, o que tende a inviabilizar as capacidades de corte deste disjuntor [2]. Como tal, para garantir a viabilidade de corte, é indispensável haver manutenções

frequentes para filtrar o óleo e melhorar as suas propriedades. Uma vez que este meio é muito inflamável, existem grandes possibilidades de riscos de incêndio, não sendo seguro para os operadores.

Em 1970, surgiram no mercado os disjuntores a vácuo que eram dotados de características de corte muito superiores e cujas necessidades de manutenção eram muito menos frequentes em comparação com as soluções anteriormente existentes. Posteriormente, em 1980 [6] e [7] surgiu uma tecnologia concorrente, o disjuntor a SF_6 - Hexafluoreto de Enxofre. Estas tecnologias apresentam dimensões muito mais reduzidas e não possuem um risco de incêndio tão elevado.

Uma vez que estes disjuntores são os que atualmente tem uma forte expressão e são os mais aplicados para extinguir o arco, serão detalhados no capítulo 3 os aspetos construtivos de cada um e ainda as suas vantagens.

Atualmente os componentes existentes nas celas estão dispostos por módulos e são protegidos por um involucro metálico. Os aparelhos de corte e de manobra são isolados a ar – AIS – *Air-Insulated Switchgear* [8] e [9] ou são isolados a gás GIS – *Gas Insulated Switchgear* [10], [11] e [12]. Ambas as soluções são dotadas de aparelhos de corte em vácuo ou em SF_6 , conforme as necessidades da instalação. Com o aparecimento das celas GIS, surgem também novas soluções de desenhos para os encravamentos, sendo estes projetados por 3 posições (Aberto/ Fechado/Ligado à terra) [10] e [13].

A evolução tecnológica permitiu também que o sistema elétrico de energia se desenvolvesse no sentido de melhorar os seus níveis de automação. Deste modo foram introduzidos equipamentos remotos que possibilitam aos operadores controlar e monitorizar a rede em permanência.

Através destes mecanismos remotos baseados em SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition* [14] – os operadores conseguem avaliar o estado da rede e atuar remotamente sobre os equipamentos existentes nas celas de forma a restaurar o sistema. Caso as instalações não sejam dotadas destes aparelhos SCADA, as celas têm que ser manobradas manualmente.

Atualmente as celas existentes no mercado são extremamente versáteis, permitem ser facilmente interligadas com outras celas e consoante os requisitos das instalações podem ser configuradas de forma personalizada.

Capítulo 3

Aspetos construtivos da Cella

3.1 Introdução

Tal como já foi referido anteriormente, a introdução das celas na rede elétrica de energia está diretamente relacionada com a fiabilidade da mesma. Durante o funcionamento normal da rede, a cela permite proteger e comutar os restantes dispositivos. Em caso de curto-circuito, a cela terá de detetar a falha e possibilitar o isolamento da área de defeito sem prejudicar o sistema, podendo garantir a alimentação alternativa das cargas.

De forma a evitar estragos nos restantes equipamentos da rede, como por exemplo geradores, transformadores, ou outros, a cela deve operar de forma rápida e eficiente, caso contrário faria com que o resto do sistema fosse desligado, e a alimentação das cargas não seria garantida.

Neste capítulo serão detalhados mais exaustivamente os aspetos construtivos das celas que lhes permitem ter todas essas características. Serão também tratados exemplos de aplicação e feito o levantamento das celas de média tensão disponibilizadas no mercado pela EFACEC.

Uma cela elétrica integra vários componentes, nomeadamente fusíveis, disjuntores, interruptores-seccionadores e sistemas de terra e são envoltos por um invólucro metálico [15], [2] e [16]. Os próximos pontos detalham qual é o aspeto construtivo e o método operacional de cada um destes componentes, podendo estes ser classificados como:

- Aspetos construtivos elétricos;
- Aspetos construtivos mecânicos.

3.2 Disjuntores

Uma vez que é o disjuntor que permite à cela detetar e atuar sobre a corrente de curto-circuito, será analisado em maior detalhe a construção deste componente e quais os principais tipos de disjuntor existentes. Em caso de falha no sistema, os contactos do disjuntor devem ser puxados através de um mecanismo que abre o circuito, permitindo que a corrente percorra um arco voltaico até a descarga ser eliminada. O arco é produzido através da ionização do meio entre os contactos. No momento, em que os contactos se abrem, a temperatura elevada permite que o meio entre eles se ionize. A corrente flui através da resistência do arco que é inversamente proporcional à intensidade da corrente, e diretamente proporcional à tensão. O arco voltaico é mantido enquanto houver diferença de potencial e as partículas ionizadas se mantiverem entre os contactos. O objetivo do disjuntor é eliminar o arco dentro do menor tempo possível para que o calor provocado por ele não provoque estragos no dispositivo, nem no resto do sistema. Tal como já foi referido anteriormente, a intensidade da corrente é tanto menor quanto maior foi a resistência do arco. Os seguintes pontos descrevem os fatores que permitem aumentar a resistência do arco:

- Comprimento do arco – A resistência aumenta com o comprimento da distância dos contactos;
- Grau de ionização – A diminuição do número das partículas ionizadas entre os contactos permite que a resistência aumente;
- Temperatura entre os contactos - A diminuição da temperatura entre contactos aumenta o arco pode ser obtido por uma resistência de gás. Ventilação eficiente dirigida ao longo do arco;
- Divisão do arco – O arco pode ser dividido em vários arcos em série, permitindo que cada um desses arcos sofra um alongamento e arrefeça durante este processo;

De acordo com o meio em que o disjuntor opera, existem vários métodos que permitem que este atue de forma eficiente abrindo o circuito elétrico, eliminando rapidamente o arco elétrico. Os meios mais utilizados atualmente são:

- Disjuntores a vácuo;
- Disjuntores a SF_6 .

3.2.1 Disjuntores a vácuo

Neste tipo de disjuntores a técnica utilizada para interromper o arco elétrico é o vácuo, ou seja, a abertura dos contatos (contato móvel e um fixo) é efetuada dentro de câmaras a vácuo, que possuem muito boas características de isolamento. A ionização das partículas metálicas resultantes

da evaporação dos contactos durante a abertura em vácuo forma um arco. No entanto, o arco é rapidamente extinto porque as partículas metálicas condensam nas superfícies dos contactos, onde é recuperada a rigidez dielétrica entre os mesmos. Uma vez que a rigidez dielétrica é rapidamente recuperada, esta técnica apresenta uma grande capacidade de isolamento em câmaras substancialmente pequenas. O arco voltaico pode ser classificado como arco difuso ou arco contraído, onde são respetivamente formados para interromper pequenas correntes de curto-circuito (aproximadamente até 10kA) ou correntes elevadas (a partir de 10kA) [17].

Este tipo de disjuntor, é normalmente composto por um cilindro cerâmico isolante, onde o contacto móvel é interligado com um mecanismo de controlo por fole de aço inoxidável. Este mecanismo permite estancar o vácuo da câmara para o meio ambiente, de modo a evitar fugas.

A figura 3.1, na página 11, representa o aspeto construtivo de um disjuntor a vácuo:

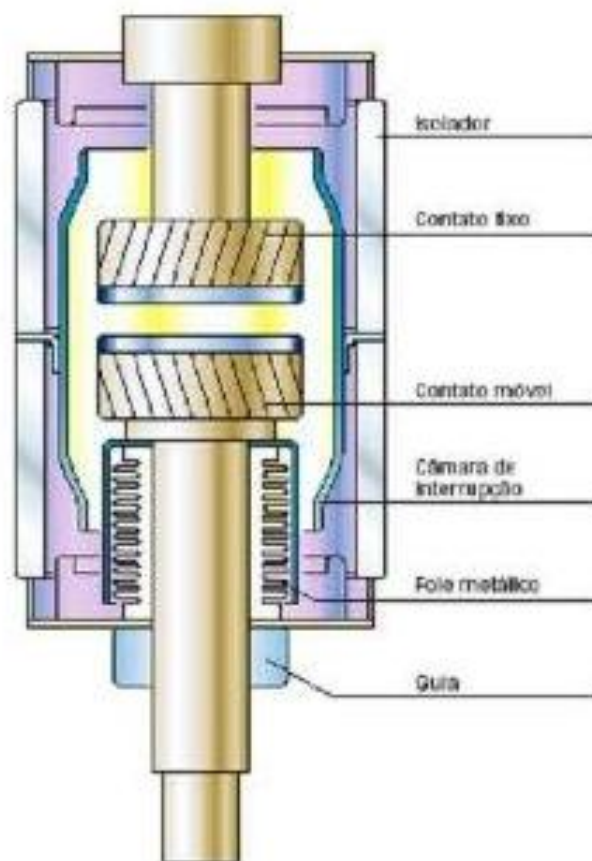


Figura 3.1: Ilustração de um disjuntor a vácuo [18]

Os seguintes pontos enumeram as vantagens que os disjuntores a vácuo apresentam:

- Uma vez que não são necessários óleos ou gases para extinguir o arco, estes disjuntores são considerados bastantes seguros nas suas operações – não existe o risco de incêndio;
- Possibilitam inúmeras manobras sem que haja frequentes manutenções – a sua constituição permite garantir o isolamento total das câmaras de vácuo, ou seja, não existindo contaminações no meio;
- Como o vácuo apresenta boas capacidades de isolamento, e não está relacionado com as dimensões do dispositivo, estes disjuntores podem ser utilizados em volumes pequenos;
- O meio utilizado neste disjuntor possibilita a facilidade de efetuar múltiplos religamentos automáticos.

3.2.2 Disjuntores a SF_6

O gás SF_6 designado por Hexafluoreto de enxofre, possui propriedades excelentes de isolamento, sendo por isso também um dos meios mais utilizados para extinguir o arco elétrico. O SF_6 , é um gás eletronegativo que a temperaturas e a pressões normais, não inflama, não apresenta quaisquer cheiros, é incolor, e tem uma forte tendência para absorver eletrões livres. Quando os contactos do disjuntor são abertos, é formado um arco onde o gás SF_6 captura os eletrões livres existentes no mesmo e gera iões negativos imóveis. Através desta perda de eletrões livres, o arco é extinto. Os contactos fixos e móveis neste tipo de disjuntores são imersos numa câmara de extinção a gás SF_6 . Estes disjuntores podem ser classificados como disjuntores de pressão dupla ou de pressão única. Nos disjuntores de dupla pressão existe uma válvula na ligação entre a câmara e o reservatório, interno ao disjuntor, que permite que um fluxo de gás SF_6 entre para a região dos contactos onde a pressão é baixa de forma a interromper o arco. Após o arco ter sido extinto, neste caso de pressão dupla, o disjuntor possui um compressor a gás, onde a transferência de gás é novamente reposta no reservatório de alta pressão. Os reservatórios de alta pressão, em ambientes de temperaturas baixas, podem possuir resistências de aquecimento para evitar riscos de liquidação. Os de pressão única, não dispõem do compressor a gás, em que a diferença de pressão é conseguida através da compressão da movimentação da haste do contato móvel, produzindo um fluxo de gás sobre o arco. Neste caso como a pressão é relativamente baixa, os disjuntores a SF_6 suportam temperaturas baixas sem ser necessário um sistema auxiliar de aquecimento [17].

A rigidez dielétrica do gás SF_6 depende da quantidade de moléculas que este apresenta num determinado volume, logo está diretamente relacionada com a densidade do gás. Sendo bastante difícil medir a densidade do SF_6 , é necessário monitorizar constantemente a pressão existente no gás.

Este tipo de disjuntores apresenta mais vantagens sobre os disjuntores a ar comprimido e a óleo:

- O tempo interrupção do arco é muito mais reduzido, devido às propriedades do gás SF_6 (2 a 3 ciclos);
- A rigidez dielétrica do SF_6 é 2,5 vezes superior à rigidez do ar, permitindo interromper correntes muito mais elevadas [19];
- Uma vez que o corte da sobrecarga num disjuntor a SF_6 é efetuado em circuito fechado sem fugas para a atmosfera, a operação é muito mais silenciosa comparativamente aos de ar comprimido;
- Exigem muito menos operações de manutenção do que os disjuntores a óleo ou ar comprimido;

3.3 Interruptores-Seccionadores

Para dividir o sistema elétrico em secções e isolar equipamentos, em caso de reparações ou manutenções, as celas devem ser dotadas de aparelhos de manobra, também conhecidos por seccionadores. No entanto, os seccionadores não podem ser operados em carga, têm que ser sempre manobrados em vazio. Desta forma é indispensável que os seccionadores sejam interligados com interruptores. Os interruptores designados como aparelhos de corte permitem que a corrente seja interrompida para que o operador não corra riscos de segurança for manobrar o seccionador. Embora a corrente tenha sido cortada pelo interruptor, ao abrir os contactos móveis do seccionador ainda podem existir correntes desprezáveis que podem provocar a existência de um pequeno arco elétrico. No caso do corte da corrente, de forma a extinguir o arco elétrico sem qualquer risco os contactos móveis devem estar inseridos em meio isolante adequado. A abertura ou fecho dos contactos só pode ser efetuada por ação mecânica [20].

Uma vez que estes aparelhos não atuam automaticamente quando detetam curto-circuitos, como é o caso do disjuntor, devem ser capazes de suportar sobrecargas durante um período de tempo até o operador da rede dar instruções de corte e abertura. Os sistemas SCADA permitem nestas situações auxiliar a comutar estes dispositivos. Apesar de a cela possuir um mecanismo de controlo automático, a mesma tem que possuir um mecanismo manual, para ser possível operar a cela sem colocar em causa o sistema no caso do sistema eletrónico falhar.

3.4 Encravamentos

É indispensável que as celas sejam dotadas de encravamentos mecânicos para assegurar a segurança dos operadores. O encravamento aberto, Figura 3.2, garante que a corrente foi cortada. Contudo, podem existir ainda correntes desprezáveis e para garantir totalmente a proteção dos operadores, quando estes efetuam reparações ou manutenções, é fundamental os aparelhos de

corte e os de manobra sejam ligados à terra, ver figura 3.3. Deste modo, caso ocorram fugas de corrente, estas podem ser escoadas para a terra sem colocar em causa a segurança das pessoas. A posição fechado, representada na Figura 3.4 permite a passagem de corrente pelo circuito e assegura a alimentação das cargas. Atualmente a maioria das celas disponibilizadas no mercado mundial apresenta estes três enclavamentos. Na parte frontal da cela é facilmente visível em que enclavamento é que a mesma se encontra. Será ilustrado no capítulo 5 o método de enclavamento do equipamento de ensaio.

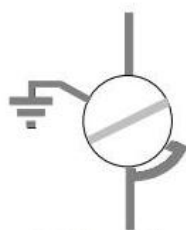


Figura 3.2: Enclavamento Aberto [21]

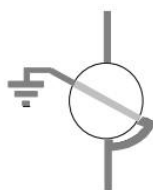


Figura 3.3: Enclavamento Terra [21]

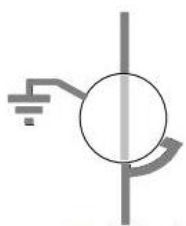


Figura 3.4: Enclavamento fechado [21]

3.5 Sistemas de Terra

Tal como já foi referido anteriormente, as celas atuais possuem o enclavamento para ligar os componentes existentes nas celas à terra. Deste modo, as celas devem possuir condutores de terra para que, quando o operador manobrar o enclavamento para esta posição, as fugas de correntes

ainda existentes possam ser escoadas para o solo de forma rápida e eficiente, sem que surjam tensões de passo ou de toque de valores superiores ao tolerável.

Ao longo da extensão do invólucro metálico da cela, existe um condutor de cobre que possibilita que os aparelhos existentes na cela sejam interligados a este barramento de terra. Este barramento está por sua vez conectado a um terminal de cabo localizado na parte inferior da cela. Este terminal está interligado com a estrutura metálica da cela. Deste modo, a estrutura metálica da cela deve estar ligada à terra para que, nos casos em que a cela é percorrida por correntes desprezáveis, estas sejam escoadas para a terra.

3.6 Posto de Transformação Cliente (PTC)

As celas de média tensão podem ser aplicadas em postos de transformação ou em instalações industriais. Os postos de transformação podem ser classificados como postos de transformação públicos (PTD) ou por postos de transformação de cliente (PTC). A escolha das celas a serem inseridas depende das características da rede de distribuição e das necessidades dos equipamentos a proteger. A título de exemplo, os próximos pontos descrevem de que forma é que um PTC pode ser constituído [22].

Este tipo de transformador é normalmente interligado com uma rede de distribuição explorada em anel e existem cinco celas que o protegem ou comutam:

- Celas de entrada e de saída – 1 interruptor-seccionador tripolar de corte em carga; 1 seccionador de terra; 1 caixa de fim de cabo;
- Celas de corte geral e contagem – 1 interruptor-seccionador tripolar de corte em carga; 3 transformadores de corrente; 2 transformadores de tensão;
- Celas de proteção – 1 interruptor-seccionador tripolar, 1 disjuntor tripolar, 1 seccionador de terra, 3 transformadores de corrente, 1 relé de proteção indireta máxima de corrente;
- Celas para transformadores de potência;

A figura 3.5 ilustra uma cela típica utilizada num posto de transformação, onde é equipada por um seccionador e um disjuntor isolados por SF_6 .

3.7 Soluções atuais existentes no mercado

Uma vez que é importante compreender quais são as soluções atuais no mercado e quais as suas funções de aplicação, serão abordadas neste ponto as particulares das celas que a EFACEC

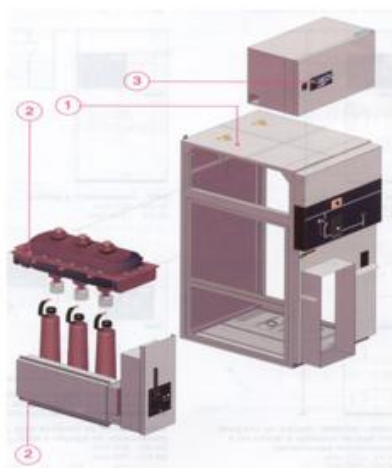


Figura 3.5: Cella dotada de disjuntor isolado a SF_6 [22]

1 - Invólucro metálico da cela de um posto de transformação isolada a SF_6 dotada de um disjuntor e um seccionador; 2- Seccionador (Superior) e disjuntor (Inferior); 3 - Painel com o relé de protecção.

disponibiliza para a rede de distribuição de MT [23] e [21].

A EFACEC oferece aos seus clientes várias alternativas para as suas necessidades de implementação. Existem celas adequadas a instalações interiores e exteriores com isolamento a ar ou isoladas a gás com várias funções disponíveis. Consoante os requisitos da implementação da instalação, podem ser seleccionadas celas dotadas com disjuntores a vácuo ou a SF_6 .

Para as redes de média tensão até 36kV a EFACEC disponibiliza as celas Normafix, onde se enquadra o equipamento de ensaio, e as celas Fluofix. As celas Normafix são quadros modulares isolados a ar e as Fluofix são isoladas a SF_6 .

Os seguintes pontos descrevem as características das celas inseridas na gama Normafix e as funções típicas mais relevantes que estas desempenham:

- IS - Cella modular isolada a ar e equipada com um interruptor-seccionador a SF_6 (Figura 3.7). O equipamento em ensaio é deste tipo de cela e será analisado em mais detalhe no capítulo 5.
- CIS - Cella modular isolada a ar, equipada com um interruptor-seccionador a SF_6 com um mecanismo de operação diferente da cela IS e dotada de fusíveis. Estas celas são adequadas para protecção de transformadores através de fusíveis (Figura 3.8).
- DC - Cella modular com isolamento a ar e equipada com disjuntor a vácuo (DIVAC) ou a SF_6 (DIFLU). São celas dotadas de disjuntores para protecção de cabos (Figura 3.9).

- DB - Cella modular isolada a ar com a finalidade de proteger barramentos e medir tensões ou correntes (Figura 3.6).

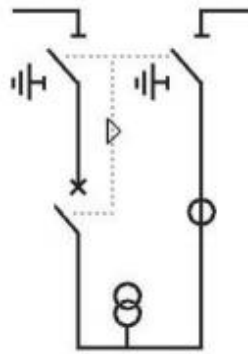


Figura 3.6: Esquema unifilar de uma cela Normafix DB [23]

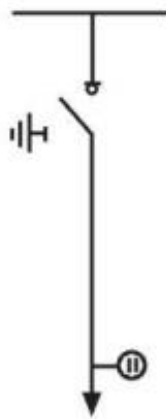


Figura 3.7: Esquema unifilar de uma cela Normafix IS [23]

A figura 3.10 ilustra as grandezas das características elétricas para as quais as celas Normafix são projetadas.

As celas Fluofix são quadros modulares isolados a SF_6 e são dotadas de funções típicas idênticas às celas Normafix. Estas soluções são isoladas a SF_6 são mais eficazes na extinção do arco que as celas dotadas a ar - AIS. As soluções Fluofix possibilitam que celas sejam agrupadas de forma compacta de forma a possuir algumas das seguintes funções típicas:

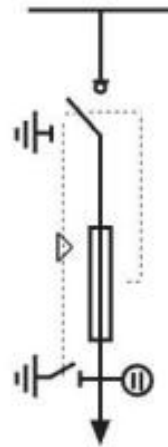


Figura 3.8: Esquema unifilar de uma cela Normafix CIS [23]

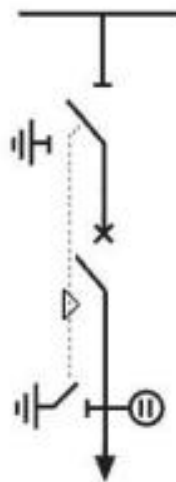


Figura 3.9: Esquema unifilar de uma cela Normafix DC [23]

Características eléctricas				
Tensão nominal	12 kV	17.5 kV	24 kV	36 kV
Nível de isolamento				
Ao choque (1,2 / 50 μ s)	75 kVp	95 kVp	125 kVp	170 kVp
Frequência industrial	28 kV / min	38 kV / min	50 kV / min	70 kV / min
Corrente nominal	630 A			630 / 1250 A
Corrente de curta duração admissível	16 kA (3 s); 20 kA (1 s)			

Figura 3.10: Grandezas das caraterísticas eléctricas celas Normafix [23]

- 2IS+CIS – Esta unidade é composta por duas celas iguais ao nosso equipamento de ensaio, ou seja, IS e mais uma cela CIS. É constituída por três interruptores-seccionadores em que uma delas é composta por fusíveis (Figura 3.11)
- 2IS+DC – É composta por uma cela DC dotada de um disjuntor de linha a vácuo e um interruptor-seccionador e duas celas 2IS(Figura3.12).
- 2IS+2CIS - Esta configuração possui duas celas do tipo IS e duas do tipo CIS (Figura3.13).

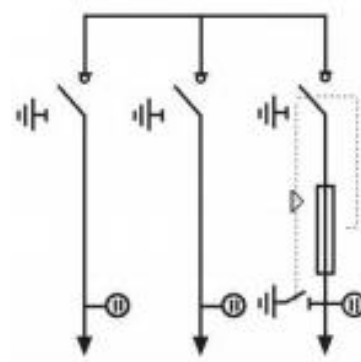


Figura 3.11: Esquema unifilar de uma unidade 2IS+CIS [23]

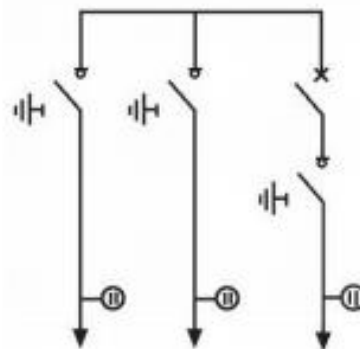


Figura 3.12: Esquema unifilar de uma unidade 2IS+DC [23]

A figura 3.14 ilustra as grandezas das características elétricas que as celas Fluofix apresentam.

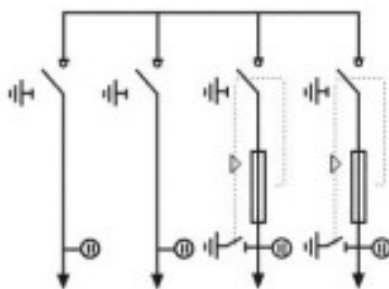


Figura 3.13: Esquema unifilar de uma unidade 2IS+2CIS [23]

Características eléctricas				
Tensão nominal	12 kV	17.5 kV	24 kV	36 kV
Nível de isolamento Ao choque (1,2 / 50 µs)	75 kVp	95 kVp	125 kVp	170 kVp
Frequência industrial	28 kV / min	38 kV / min	50 kV / min	70 kV / min
Corrente nominal	até 630 A			
Corrente de curta duração admissível	25 kA (1 s)	20 kA (1 s)		
Temperatura	-25 °C / + 40 °C (outras, sob pedido)			

Figura 3.14: Caraterísticas eléctricas celas Fluofix [23]

Capítulo 4

Documentos normativos referentes aos ensaios dielétricos

4.1 Introdução

Neste capítulo serão abordadas as diretivas definidas nas normas de segurança IEC 60060-1 [24], IEC 60060-2 [25], IEC 62271-1 [26] e IEC 62271-200 [27], que estabelecem os procedimentos para a realização de ensaios dielétricos. Estas normas são estipuladas pelo IEC- *International Electrotechnical Commission*. As normas IEC 62271-1 e IEC 62271-200 definem quais os ensaios que devem ser realizados às celas e quais os critérios necessários para certificar que as mesmas podem ser colocadas em serviço de forma a desempenharem corretamente as funções para as quais foram projetadas. As normas IEC 60060-1 e IEC 60060-2 descrevem quais as diretivas genéricas para efetuar ensaios dielétricos a altas tensões e que são complementares às normas IEC 62271-1 e 62271-200 para a realização de ensaios dielétricos a celas de média tensão. Todas as celas atualmente disponíveis no mercado devem cumprir integralmente as normas acima referenciadas.

Como tal, antes de efetuar o trabalho experimental é extremamente importante dominar e compreender corretamente todas as diretivas acima descritas.

4.2 Condições Normais de Serviço

Durante o dimensionamento de fabrico de uma cela, o fabricante tem que ter em consideração quais são as circunstâncias da rede em que a mesma será instalada. A norma IEC 62271-1, estabelece que as celas serão normalmente aplicadas em condições normais de serviço e que operam de acordo com os seus valores nominais.

As condições normais diferem consoante o tipo de instalação - exterior ou interior. Uma vez que o equipamento em ensaio deste estudo é adequado a instalações interiores, será apenas descrito quais as condições necessárias para instalações interiores de modo a certificar que a cela se encontra a operar em circunstâncias normais.

Conforme referenciado na norma IEC 62271-1, os seguintes pontos detalham quais as condições que a cela deve cumprir para se assegurar que esta está a operar em circunstâncias normais:

- A temperatura média em 24 horas não pode ser superior aos 35°C e temperatura máxima não pode exceder os 40°C;
- Deve ter preferencialmente a temperatura mínima de -5, -15°C ou -25°C;
- Uma vez que se trata de instalações interiores, não é necessário haver preocupações com radiações solares;
- A altitude da instalação não pode ser superior a 1000m;
- As condições do ar são consideradas limpas, ou seja, não apresentam grandes quantidades de poluição nem são inflamáveis ou corrosivas;
- Num período de 24 horas, o valor médio da humidade relativa não pode ser superior a 95% e o valor médio da pressão hídrica não pode exceder os 2,2 kPa;
- Durante um mês, o valor médio da humidade relativa não pode ser superior a 90% e o valor médio da pressão hídrica não pode exceder os 1,8 kPa;
- Irá assumir-se que em circunstâncias normais de serviço a cela será inserida em redes onde não ocorrem sismos, logo as condições de vibração serão desconsideradas;

A condensação nos circuitos pode ocorrer caso existam bruscas variações de temperatura em ambientes com humidades elevadas. Para além das condições normais de serviço para instalações interiores, a norma IEC 62271-1 refere também quais são os requisitos a cumprir para instalações exteriores.

Contudo, existem situações em que os requisitos acima descritos não se verificam e as celas devem ser projetadas para cumprir particularidades especiais referidas nas normas. Estas condições especiais incidem especialmente na altitude, na poluição, na temperatura, humidade e vibrações. Nestas circunstâncias, o fabricante necessita de consultar várias normas, como por exemplo, em casos em que o ar é muito poluído em instalações exteriores, as diretivas definidas na norma IEC 60815 devem ser aplicadas. Para instalações interiores deve ser analisada a norma IEC 60932.

A norma IEC 62271-1, estabelece que devem ser efetuados um conjunto de ensaios às celas, sendo que estes podem ser classificados como ensaios tipo ou ensaios de rotina.

4.3 Ensaios Tipo

Os Ensaios tipo devem ser realizados pelo fabricante ou por uma entidade externa com o objetivo de comprovar que o equipamento apresenta os requisitos necessários para desempenhar corretamente as suas funções. Os ensaios tipo devem ser efetuados de acordo com as diretivas IEC 62271-1 e IEC 62271-200 de forma a certificar a qualidade do equipamento. Após a constatação da qualidade do produto, garante-se que o mesmo irá suportar os valores nominais para os quais foi projetado e o fabricante poderá comercializá-lo.

Para este tipo de ensaios há um conjunto de ensaios que devem ser efetuados para certificar a cela. Por uma questão de conveniência, conforme a norma IEC 62271-1 podem ser agrupados em quatro grupos. A tabela 4.1, referenciada pela norma IEC 62271-1, serve a título de exemplo de como estes testes podem ser agrupados.

Tabela 4.1: Descrição geral dos ensaios tipos a executar numa cela

Grupo	Ensaios Tipo
1	Ensaios dielétricos nos circuitos principais Radio interference voltage test
2	Medir a resistência no circuito principal Ensaios de Aquecimento - Corrente
3	Ensaios de tempo de corte e de pico Ensaios para verificar a proteção do involucro Ensaios de impermeabilidade – quando aplicados
4	Ensaios mecânicos Ensaios ambientais Ensaios dielétricos nos circuitos auxiliares;

Existe um conjunto de informações que a norma IEC 62271-1 refere como sendo essenciais serem incluídas no relatório após a realização destes ensaios:

- Fabricante;
- Designação e número de série do equipamento de ensaio;
- Valores nominais testados, conforme especificado nas normas standard;
- Descrição geral do equipamento de ensaio incluindo o número de polos;

- Características relevantes dos componentes principais, como por exemplo, operações mecânicas, interruptores, impedâncias shunts;
- Detalhes dos mecanismos de operação e dos equipamentos utilizados durante os ensaios;
- Fotografias que ilustrem os ensaios – antes e depois dos ensaios;
- Desenhos e esquemas de dados suficientes que representem os ensaios;
- Referenciar todos os desenhos para identificar as partes essenciais envolvidas na realização experimental;
- Detalhes das disposições de ensaio, incluindo o diagrama do circuito de ensaio;
- Descrição do comportamento do equipamento de ensaio, no decorrer dos testes;
- Conforme especificado na norma, registrar e listar valores quantitativos ao longo do ensaio;

4.4 Ensaios de Rotina

Para verificar se existem falhas na construção do material do equipamento devem ser efetuados, sempre que necessários, ensaios de rotina para averiguar se as celas estão a ser produzidas em conformidade com os ensaios tipo. A complexidade destes ensaios é muito inferior às do ensaio tipo e não colocam em causa as propriedades da cela nem a fiabilidade da mesma. Estes ensaios podem ser efetuados pelo fabricante nas suas instalações ou nas instalações do cliente se este possuir as condições necessárias para a realização dos mesmos. Segundo a norma IEC 62271-1 [26], os seguintes pontos enumeram quais os ensaios de rotina que devem ser efetuados à cela para certificar que foi fabricada de acordo com as suas especificações e que suporta os valores nominais para os quais foi projetada:

- Ensaios dielétricos nos circuitos principais;
- Ensaios nos circuitos auxiliares e de controlo;
- Medição da resistência nos circuitos principais;
- Ensaios de impermeabilidade;
- Ensaios de projeto e de inspeção visual;

Uma vez que o LAT é uma entidade externa à EFACEC serão efetuados neste trabalho ensaios tipo para permitir ao LAT desenvolver e melhorar estas competências. Serão efetuados ensaios dielétricos nos circuitos principais de acordo com os ensaios tipo definidos na norma IEC 62271-1 para analisar se o comportamento da cela está em conformidade para suportar os valores nominais para a qual foi projetada.

4.5 Ensaios Dielétricos no circuito principal

Para se efetuar os ensaios dielétricos, a norma IEC 62271-1 refere que as condições atmosféricas necessitam de cumprir as diretivas estabelecidas pela norma IEC 60060-1. As descargas dependem bastante das condições atmosféricas e quanto maior for a humidade relativa maior é o valor de pico da tensão. A tensão torna-se irregular caso a humidade relativa seja superior a 80%, principalmente se a descarga ocorrer na superfície do isolamento.

De forma abranger todas as situações plausíveis, as normas definem que os ensaios podem ser realizados em ambientes secos ou húmidos. Para os testes em ambientes secos é necessário cumprir as seguintes condições atmosféricas de referência:

- Temperatura - $T_o = 20^\circ C$;
- Pressão Absoluta - $P_o = 1013hPa$;
- Humidade Absoluta - $H_o = 11g/m^3$;

Isto significa que se a cela for ensaiada em situações que diferem dos valores acima referidos, é indispensável aplicar fatores de correção para converter a tensão para estas condições atmosféricas. A tensão corrigida às condições atmosféricas pode ser obtida através da fórmula 4.1.

$$U_o = U / K_t \quad (4.1)$$

- Tensão normalizada - U_o ;
- Tensão corrigida às condições atmosféricas - U ;
- Fator de correção - K_t ;

onde:

$$K_t = K_1 * K_2 \quad (4.2)$$

em que:

$$K_1 = \delta^m \quad (4.3)$$

$$K_2 = K^w \quad (4.4)$$

A norma IEC 62271-1 refere que para valores nominais iguais ou inferiores a 52 kV, podemos assumir o seguinte:

$$- h > 11g/m - m = 1 \text{ e } w = 1$$

$$- h < 11g/m - m = 1 \text{ e } w = 1$$

Uma vez que as celas de média tensão são dimensionadas para uma tensão menor ou igual que 36kV, podemos assumir os seguintes valores:

$$K_1 = \delta \quad (4.5)$$

$$K_2 = K \quad (4.6)$$

Para o cálculo da densidade relativa deve ser utilizada a fórmula.

$$\delta = \frac{p}{p_o} \times \frac{(273 + t_o)}{(273 + t)} \quad (4.7)$$

Esta correção só é válida se o K1 estiver compreendido no intervalo [0,8 – 1,5];

Onde K é um parâmetro que depende do ensaio que se está a realizar. Para o ensaio à onda choque será utilizada a fórmula X, enquanto para frequência industrial será aplicada a fórmula Y.

Impulso -

$$k = 1 + 0,010\left(\frac{h}{\delta} - 11\right) \quad (4.8)$$

AC -

$$k = 1 + 0,012\left(\frac{h}{\delta} - 11\right) \quad (4.9)$$

A tensão que uma descarga atmosférica normalmente produz é caracterizada como transitório aperiódico, ou seja, que cresce muito rapidamente até ao seu valor de pico e decresce lentamente até ao seu valor nulo. A onda é constituída e analisada por dois tempos, sendo estes designados por tempo de frente e tempo de cauda.

A figura 4.1 exemplifica uma onda de tensão típica produzida por uma descarga atmosférica. Através da onda de tensão verifica-se que entre o ponto A e o ponto B, representado na figura 4.1, existe uma linearização atribuída a um tempo de subida, sendo este classificado

como tempo convencional de frente. O tempo de cauda é definido como o tempo entre a origem virtual da onda (O_1) e 50% do valor máximo da tensão.

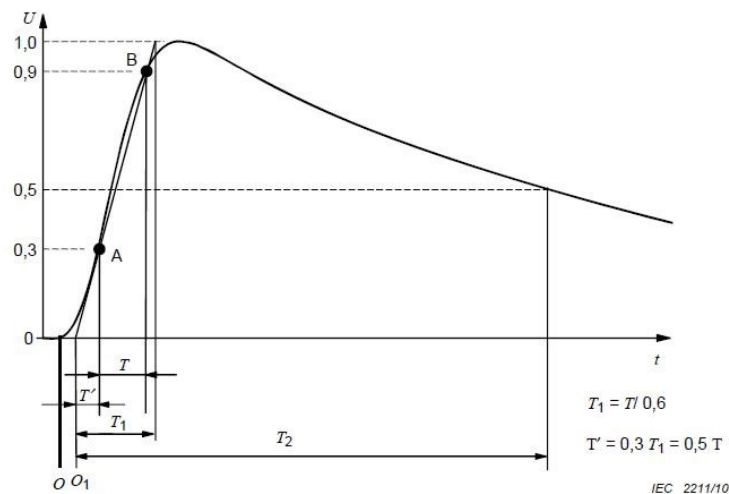


Figura 4.1: Forma de Onda Tensão de Impulso [24]

Consoante os valores do tempo de frente obtidos, isso permite ao operador analisar se a falha ocorrida na rede foi devido a uma descarga atmosférica ou a uma sobretensão de manobra executada na rede. O tempo de frente associado a uma sobretensão de manobra corresponde a um declive da onda menos acentuado o que significa que é mais prolongado o tempo até atingir a tensão de pico. No entanto, neste trabalho experimental será apenas analisada a forma de onda completa referente aos ensaios dielétricos ocorridos por uma descarga atmosférica.

Na realização dos ensaios à onda choque, a norma IEC 60060-1 define que é aceitável encontrar-se diferenças dos valores pré-estabelecidos na forma de onda obtida desde que satisfaçam as seguintes tolerâncias:

- Valor de tensão: $\pm 3\%$;
- Tempo de frente: $\pm 30\%$;
- Tempo de cauda: $\pm 20\%$;

Caso os valores obtidos pela onda completa não se enquadrem dentro destes limites, devem ser feitos ajustes às tensões e às resistências de carga para que estas tolerâncias sejam cumpridas. Durante o trabalho experimental obteve-se, numa fase inicial, um tempo de frente

muito abaixo dos limites, o que levou a ajustes ao dimensionamento das resistências inseridas no gerador de Marx.

4.5.1 Critérios de aprovação nos ensaios dielétricos

A norma IEC 62271-1 descreve quais os parâmetros que a cela deve cumprir em cada ensaio de forma a certificar o comportamento dielétrico necessário para ser introduzida na rede. Para aplicar ensaios à onda de choque a norma IEC 62271-1 descreve que existem casos gerais e casos especiais. A norma considera como sendo um ensaio especial caso o valor de tensão medido entre fases, quando o interruptor está aberto, seja superior ao valor da tensão entre fase-terra. Uma vez que o fabricante não especifica o equipamento em ensaio como um caso especial, este foi tratado como um caso geral.

Ensaio à onda de choque: Para a realização dos ensaios à onda de choque será indispensável executar ensaios fase-fase e fase-terra, inicialmente com o interruptor fechado e posteriormente com o interruptor ligado à terra. A tabela 4.2, demonstrada na norma IEC 62271-1, exemplifica onde é que a tensão de impulso deve ser aplicada e quais os terminais que devem ser shuntados. Os ensaios referentes aos números 7,8 e 9 representados na tabela 4.2, podem ser desconsiderados caso as fases de entrada e as de saída sejam simétricas entre elas. Na tabela 4.2, a letra “Q” representa o invólucro metálico da cela, que também deve estar ligado à terra.

Tabela 4.2: Condições gerais para ensaios dielétricos

Ensaio	Posição do Encravamento	Tensão aplicada à Fase	Fases ligadas à terra
1	Fechado	L111	L2L31213Q
2	Fechado	L212	L1L31113Q
3	Fechado	L313	L2L11211Q
4	Aberto	L1	L2L3111213Q
5	Aberto	L2	L1L31113Q
6	Aberto	L3	L2L11211Q
7	Aberto	(11)	L1L2L31213Q
8	Aberto	(12)	L1L2L31113Q
9	Aberto	(13)	L1L2L31112Q

As Figuras 4.2 e 4.3 esquematizam as ligações que devem ser efetuadas em ambos os ensaios.

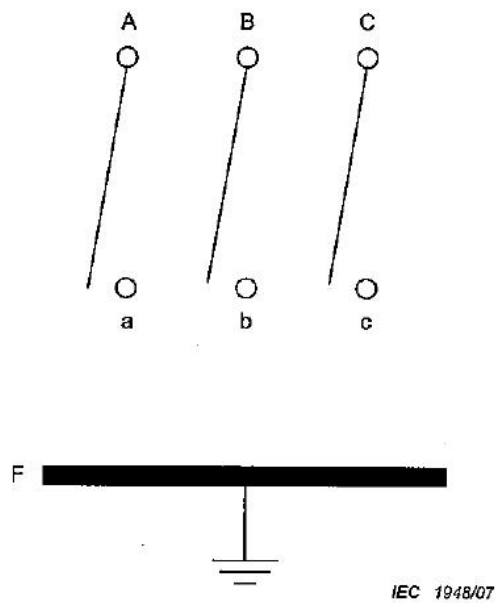


Figura 4.2: Ensaios com o encravamento Terra [26]

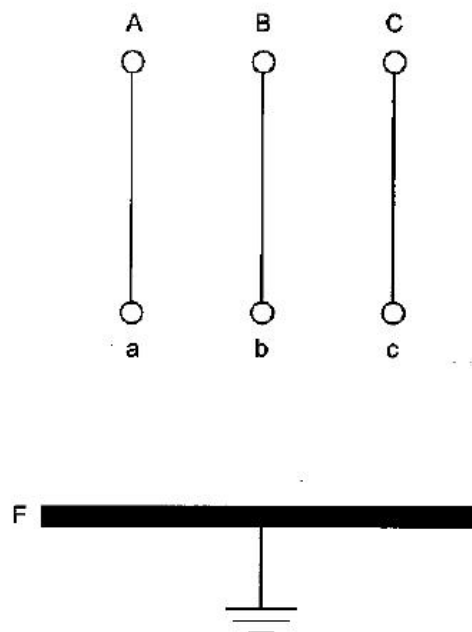


Figura 4.3: Ensaios com o encravamento Fechado [26]

A norma IEC 60060-1 descreve que o ensaio à onda de choque deve ser executado com um tempo de frente $1,2\mu s$ e com um tempo de cauda de $50\mu s$, ou seja, com uma onda de impulso $1,2/50\mu s$. As tensões a serem aplicadas em cada um dos ensaios e para cada uma

das celas são mencionadas na norma IEC 62271-1, conforme os seus valores nominais.

Numa rede elétrica podem ocorrer descargas atmosféricas com ondas de tensão de polaridade negativa e com polaridade positiva. Como tal, devem ser realizados ensaios às duas polaridades para avaliar o comportamento da rigidez dielétrica do ar e do SF_6 .

Para garantir que a cela apresenta uma rigidez dielétrica eficiente terá que cumprir os seguintes requisitos:

- Em cada uma destas séries de ensaios devem ser efetuados 15 impulsos;
- Por cada série não pode ocorrer mais de duas descargas disruptivas;
- Caso se verifique uma descarga, esta não pode danificar a rigidez dielétrica do isolamento. Após a descarga, o isolamento deve ter capacidade de regenerar a sua rigidez dielétrica, ou seja, é necessário efetuar 5 impulsos consecutivos sem que ocorra uma nova descarga;

Ensaio à frequência Industrial: Este ensaio deve cumprir as diretivas estabelecidas pelas normas IEC 60060-1, o equipamento de ensaio deve estar sujeito a uma tensão durante um minuto. A norma 60060-1 define que o valor de pico da tensão aplicada, tal como nos ensaios à onda choque, deve ser corrigido conforme as condições atmosféricas. Para definir que o ensaio é realizado em condições gerais, deve ser efetuado num intervalo de frequência de 45 Hz - 65 Hz. Uma vez que o LAT é alimentado com uma frequência a 50 Hz, não será necessário ter em consideração as condições especiais de ensaio. As ligações para a realização deste ensaio são idênticas às ligações efetuadas para o ensaio à onda de choque. O procedimento para execução deste ensaio será abordado em maior detalhe na parte experimental.

Podemos afirmar que o equipamento de ensaio se encontra em condições se durante o ensaio não ocorrer nenhuma descarga. Este ensaio será efetuado com uma tensão aproximadamente do dobro da tensão nominal do equipamento com uma duração de um minuto. Nesta dissertação estes ensaios serão realizados em ambiente seco. Caso fosse relevante efetuar ensaios em ambientes húmidos, a norma IEC 62271-1 descreve que nesta situação pode ocorrer pelo menos uma descarga. O ensaio nestas condições só é considerado válido caso a cela seja dotada de possuir capacidade de restaurar a sua rigidez dielétrica, ou seja, recupera as suas capacidades de isolamento após uma descarga e caso até ao fim do ensaio não ocorram mais descargas. Estes ensaios serão posteriormente discutidos e exemplificados na parte experimental desta dissertação, no capítulo 5

Capítulo 5

Atividade Laboratorial

5.1 Introdução

Os ensaios dielétricos referentes à realização deste trabalho foram efetuados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da FEUP. Antes de efetuar os ensaios à cela, é extremamente importante elaborar previamente um estudo que permita explorar os seus equipamentos, de forma a garantir a preservação dos mesmos e evitar riscos para a segurança dos operadores. A descrição dos equipamentos pode ser vista nos anexos deste documento - [A](#)).

Este trabalho experimental foi realizado com uma cela de média tensão Normafix (ver Figura 5.1 na página 32) com uma tensão nominal de 24kV do tipo IS, fabricada em 2016 pela EFACEC e com o número de série S18557123. É uma cela de quadro modular isolado a ar, apropriada para instalações interiores, dotada de um aparelho de corte IS – Interruptor-Seccionador tripolar, isolado a SF_6 e com mecanismo de encravamento-terra de operação CII [21].

Na parte frontal da cela existe um indicador de tensão que permite ao operador verificar se os cabos existentes na cela ainda estão em tensão, ver figura 5.3 na página 33 - ponto 6. Para comutar o encravamento “aberto”, deve ser inserido na ranhura de manobra do interruptor demonstrada na parte inferior da Fig. 5.3 – ponto 5, uma alavanca (Figura 5.2 na página 32).

De forma a ser possível efetuar esta manobra, a posição inicial do interruptor-seccionador deve estar na posição de fechado. Só é possível manobrar o encravamento “terra” caso o interruptor-seccionador esteja na posição de aberto. Na figura 5.4 na página 33 observa-se que o encravamento da cela está na posição de aberto para que seja possível manobrar o encravamento “terra”. Ao contrário do encravamento “aberto”, para operar o encravamento “terra”, a alavanca deve ser manobrada no sentido dos ponteiros do relógio.



Figura 5.1: Ilustração do equipamento de ensaio

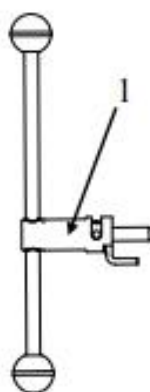


Figura 5.2: Alavanca para manobrar o encravamento da cela [21]

Devido ao interruptor-seccionador desta cela, é adequada para auxiliar a comutação na entrada e na saída de cabos de um posto de transformação. Este tipo de celas apresenta uma grande capacidade de adaptação que lhes permite serem interligadas com celas de outras configurações.

A figura 5.3 na página 33 mostra os diversos componentes existentes no equipamento de ensaio.

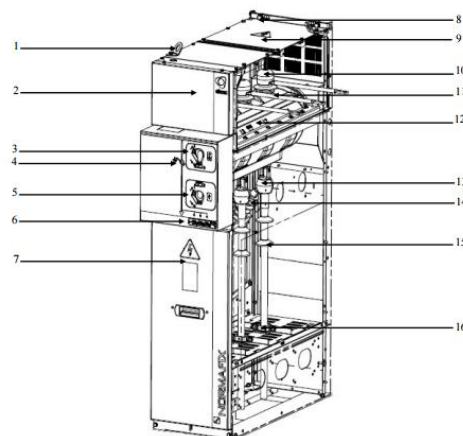


Figura 5.3: Aspecto constructivo do equipamento de ensaio [21]

1 - Acessório de auxílio para movimentar a cela; 2 - Compartimento de baixas tensões; 3 - Encravamento Terra; 4 - Visualização da posição do Encravamento; 5 - Encravamento para manobrar o Seccionador; 6 - Indicador de tensão; 7 - Porta de acesso aos cabos; 8 - Barramento Terra principal; 9 - Invólucro metálico; 10 - Isolamento do barramento; 11 - Barramento para ligar à rede; 12 - Interruptor Seccionador; 13 - Conexão de cabos MT; 14 - Isolador Capacitivo; 15 - Cabos MT; 16 - Terminal de cabos;

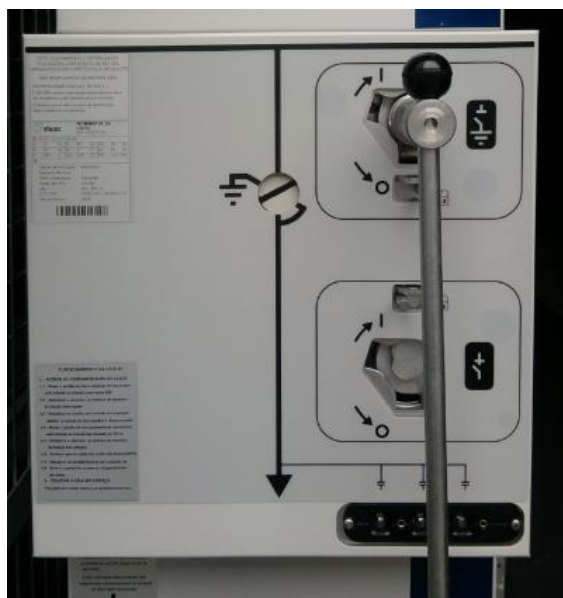


Figura 5.4: Ilustração do equipamento em ensaio com o encravamento aberto

Na tabela 5.1 na página 34 podem observar-se as dimensões que o equipamento em ensaio possui.

Tabela 5.1: Dimensões que o equipamento de ensaio possui

Altura (cm)	Largura (cm)	Profundidade (cm)	Peso (kg)
158	37.5	99.5	100

Através da figura 5.5 na página 34 é possível visualizar a chapa de características do equipamento em ensaio. Pode observar-se que a tensão nominal dimensionada para o ensaio ao impulso atmosférico é de 125kV e para a tensão para a frequência industrial é de 50 kV.



Figura 5.5: Fotografia da chapa de características do equipamento em ensaio.

5.2 Ensaios à onda de choque 1,2/50 μ s

A execução deste ensaio permite simular uma descarga atmosférica, possibilitando analisar se o aparelho de corte existente na cela apresenta a rigidez dielétrica necessária para proteger a rede de eventuais falhas.

Os equipamentos existentes no LAT possibilitam realizar este ensaio de maneira a cumprir todos os requisitos exigidos pelas normas descritas no capítulo 4. Para a realização deste ensaio foi indispensável interligar o equipamento de ensaio ao retificador, ao gerador de impulso, ao divisor de tensão e ao isolador auxiliar de ensaio, conforme ilustrado na figura 5.6 na página 35. O gerador de impulso possibilita gerar uma tensão de pico máximo de 1200kV com uma onda de frente rápida e normalizada (1,2/50) μ s e com uma energia máxima de 36kJ.

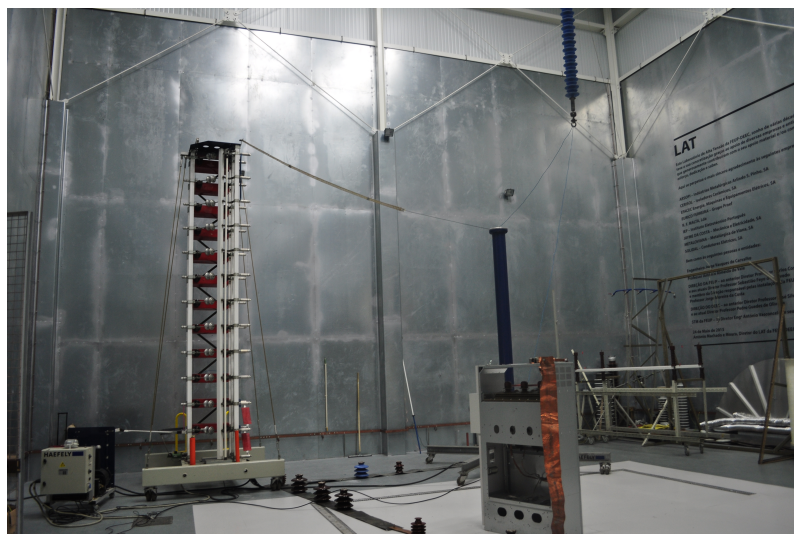


Figura 5.6: Ilustração dos equipamentos para elaborar o ensaio à onda choque

No gerador de Marx podem ser introduzidas resistências de carga que permitem controlar a forma de onda. As resistências ligadas em série e na frente do gerador possibilitam influenciar o tempo de frente. As resistências em paralelo permitem ajustar o tempo de cauda.

Durante a atividade laboratorial foram apenas inseridas duas resistências de 115 ohm em paralelo e duas de 20 ohm colocadas em série em dois andares do gerador de Marx (Figura 5.7) na página 36. Cada andar do gerador de impulso é constituído por dois condensadores, perfazendo uma capacidade máxima de 1,2 μ F.

É através da unidade de comando que o operador dá a instrução da tensão que deve ser aplicada aos terminais dos condensadores e o tempo que os mesmos devem demorar a carregar. Estes condensadores são carregados em paralelo e são descarregados em série. Neste trabalho experimental, utilizaram-se apenas dois andares, onde a tensão aplicada aos seus terminais foi de 62,5kV, com um tempo de carregamento dos condensadores de 45 segundos.

Por uma questão de boa prática, deve ser efetuado um pré-ensaio que permita avaliar a forma de onda completa para garantir a conformidade das tolerâncias acima descritas.

Conforme referenciado no capítulo 4 as normas IEC 62217-1 e a IEC 60060-1 mencionam qual o valor da tensão a aplicar, para uma cela de tensão nominal 24kV, e quais as tolerâncias a ter em consideração para obter a forma de onda completa.

Como tal, os seguintes intervalos definem quais os valores que devem ser obtidos na onda completa de forma a cumprir os valores estabelecidos pelas normas:

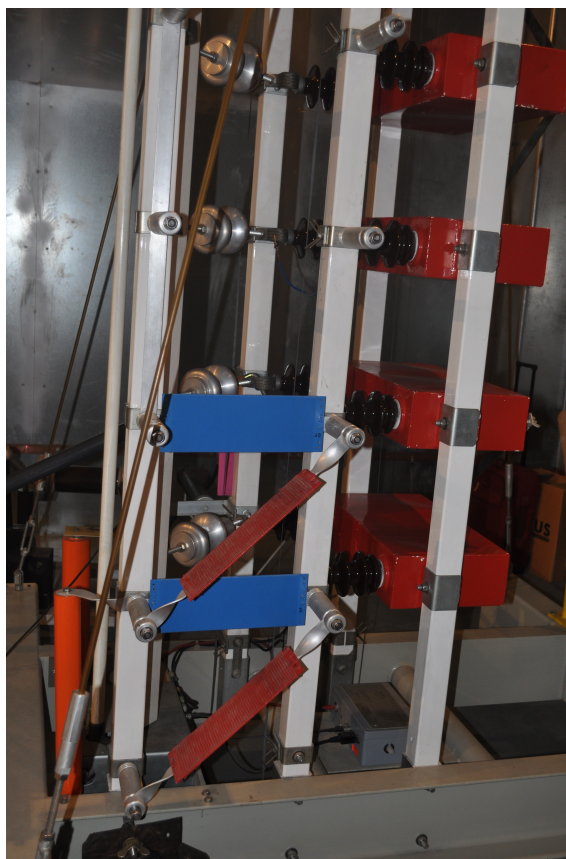


Figura 5.7: Resistências de carga

- Tensão de Ensaio – Para tensões nominais de 24kV, a tensão de referência de impulso a aplicar deverá ser 125 kV (norma IEC 62271-1) permite que segundo a norma um intervalo de tolerância [121,25-128,75] kV de valor absoluto;
- Tempo de frente de Ensaio – Possibilita obter um tempo de frente no intervalo de tolerância [0,84 – 1,56] μs ;
- Tempo de cauda de Ensaio – Permite obter um tempo de cauda compreendido entre os valores [40- 60] μs .

Contudo, observou-se que o tempo de frente obtido era de 0,81 μs , que era inferior aos limites de tolerâncias indicados pela norma IEC 60060-1. De forma a cumprir este requisito, foi necessário acrescentar à resistência de frente de 100 ohm, mais uma resistência de 230 ohm. Estas resistências foram inseridas na parte superior do gerador de impulso, conforme representado na figura 5.8 na página 37.

A figura 5.9 na página 37 ilustra a onda completa obtida pela unidade de processamento de sinal (DIAS). Pode verificar-se que o valor da tensão, o tempo de frente e o tempo de cauda se encontram dentro dos limites toleráveis pelas normas. Observa-se também que a forma

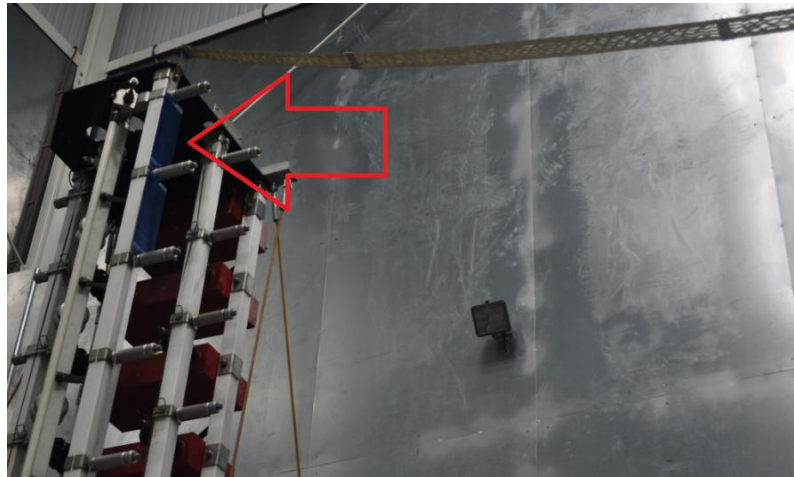


Figura 5.8: Representa as resistências adicionais à resistência de frente

de onda apresenta um pico de tensão máximo negativo, ou seja, os ensaios iniciais foram executados com a polaridade negativa.

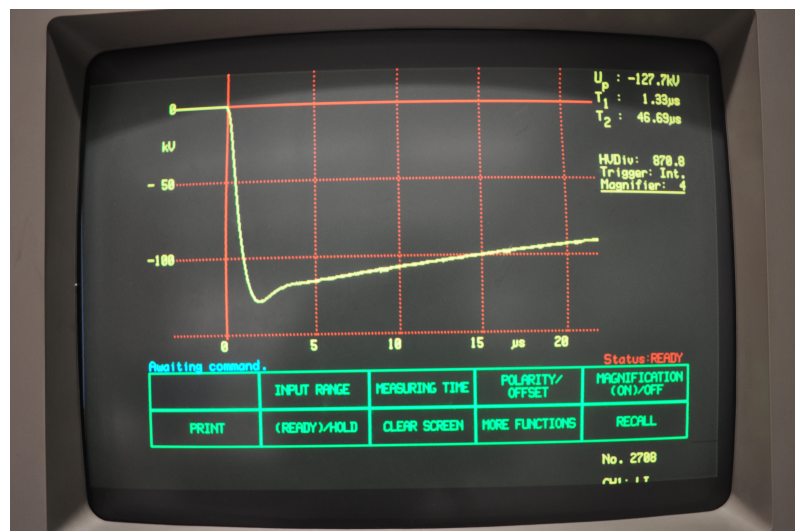


Figura 5.9: Ilustração da Onda completa registada no pré-ensaio Ensaio Fase-Fase com polaridade negativa

Idealmente os valores registados deveriam ser 125kV. No entanto, observa-se pelos valores abaixo e pelas tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 que isto não se verifica. Uma das razões pelas quais esta situação pode ocorrer deve-se ao facto de existirem capacidades parasitas no divisor de tensão.

- Tensão de pico (–127,7) kV;

- Tempo de frente $(1,3)\mu s$;
- Tempo de cauda $(46,69)\mu s$;

Os próximos pontos descrevem como é que os ensaios foram efetuados e quais os resultados que foram obtidos em cada um dos mesmos.

5.2.1 Ensaios Fase-Fase

Para este tipo de ensaio, deve ser aplicada uma tensão a uma das fases de entrada, enquanto as outras fases estão curto-circuitadas. Nesta configuração o interruptor-seccionador deve estar fechado para averiguar se não ocorre nenhum contornamento entre a fase em questão e as restantes fases, ou seja, se apresenta a rigidez dielétrica necessária para suportar uma tensão típica de uma descarga atmosférica. Podemos analisar pela figura 5.10 que o circuito está interligado com a fase de entrada L1 (ver figura 5.11), onde as outras fases L2 e L3, respetivamente as de entrada e saída, estão ligadas ao barramento de terra existente na cela (ver figura 5.12).

Quando o interruptor-seccionador se encontra fechado, existe passagem de tensão entre a fase de entrada L1 e a fase de saída l1, garante-se desta forma o ponto 1 da tabela 4.2.

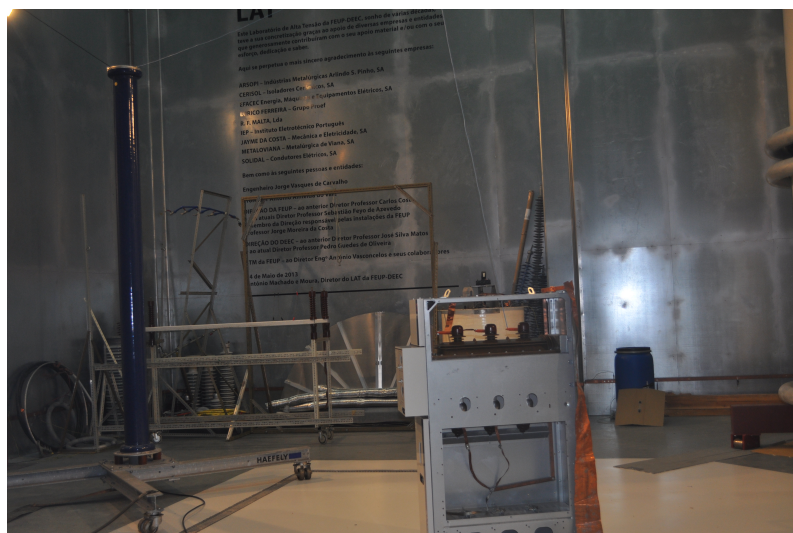


Figura 5.10: Ilustração do circuito interligado com a fase de entrada L1

Para certificar que a rigidez dielétrica do ar e do SF6 se encontram em condições, devem ser efetuados 15 impulsos em cada uma das fases. Após a medição dos valores para a fase L1, é indispensável reproduzir o mesmo procedimento para as outras fases. Aplica-se a tensão



Figura 5.11: Esquema da ligação para aplicação da tensão à fase L1



Figura 5.12: Representação das fases de saída L2 e L3 ligadas ao barramento terra

à fase de entrada L2 (Figura 5.13 na página 41) e curto circuitam-se as restantes L1 e L3, respetivamente as de entrada e saída. Consequentemente é necessário efetuar o mesmo método para a fase L3 (aplica-se a tensão à fase L3 e curto circuita-se as restantes L1 e L2).

As tabelas 5.2, 5.3 e 5.4 demonstram os 15 valores medidos em cada uma das fases com polaridade negativa.

Como descrito no capítulo 4, devem ser realizados ensaios à onda choque com polaridade positiva e negativa. Assim, de forma a cumprir com as diretivas estabelecidas, deve efetuar-

Tabela 5.2: Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L1

Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	-127,7	1,33	46,64
2	-127,7	1,33	46,78
3	-127,7	1,33	46,76
4	-127,7	1,34	46,63
5	-127,7	1,32	46,64
6	-128,4	1,36	45,41
7	-127,7	1,33	46,79
8	-127,7	1,33	46,61
9	-127,7	1,33	46,69
10	-127,7	1,34	46,55
11	-127,7	1,33	46,70
12	-127,7	1,32	46,57
13	-127,7	1,35	46,58
14	-127,7	1,34	46,53
15	-127,7	1,33	46,69

Tabela 5.3: Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L2

Fase – Fase (L2)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	-127,7	1,33	46,67
2	-127,7	1,33	46,58
3	-127,7	1,34	46,63
4	-127,7	1,35	46,64
5	-127,7	1,33	46,67
6	-127,7	1,32	46,44
7	-127,7	1,33	46,63
8	-127,7	1,35	46,48
9	-127,7	1,33	46,62
10	-127,7	1,33	46,54
11	-127,7	1,33	46,65
12	-127,7	1,32	46,62
13	-127,7	1,35	46,66
14	-127,7	1,33	46,62
15	-127,7	1,33	46,54

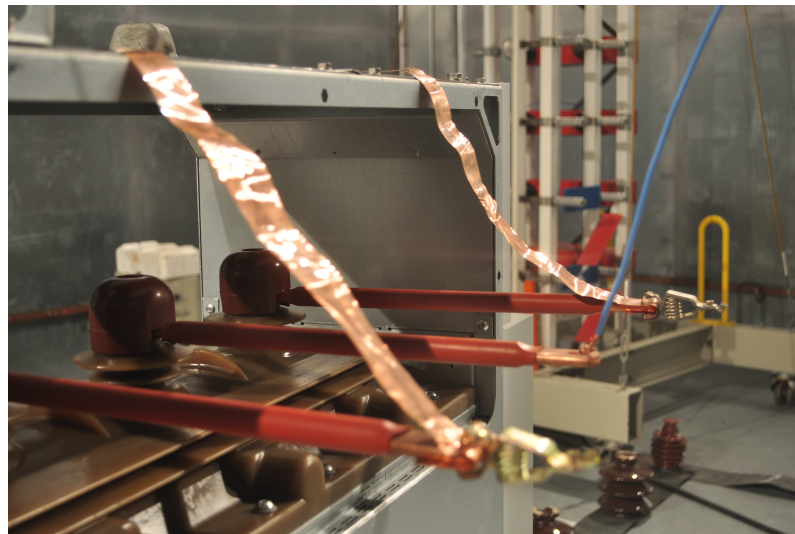


Figura 5.13: Esquema da ligação para aplicação da tensão à fase L2

se o mesmo procedimento com uma tensão de polaridade positiva. A figura 5.14 representa uma forma de onda completa de polaridade positiva.

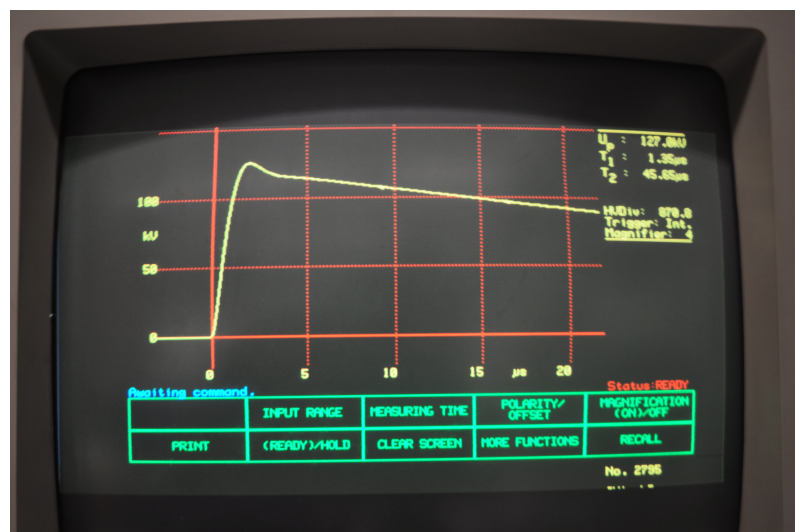


Figura 5.14: Registro da onda de tensão à polaridade positiva

As tabelas 5.5, 5.6 e 5.7 demonstram os 15 valores medidos em cada uma das fases com polaridade positiva.

Nos ensaios à polaridade positiva, obteve-se na 3^a medição uma descarga entre as fases L2 e L3. Através da figura 5.15 na página 44 verificou-se que houve um contornamento entre

Tabela 5.4: Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L3

Fase – Fase (L3)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	-127,7	1,32	46,46
2	-127,7	1,32	46,44
3	-127,7	1,33	46,65
4	-127,7	1,33	46,63
5	-127,7	1,33	46,51
6	-127,7	1,33	46,73
7	-127,7	1,35	46,66
8	-127,7	1,35	46,68
9	-127,7	1,33	46,76
10	-127,7	1,33	46,52
11	-127,7	1,36	46,49
12	-127,7	1,35	46,56
13	-127,7	1,33	46,62
14	-127,7	1,34	46,63
15	-127,7	1,34	46,67

Tabela 5.5: Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade positiva quando se aplica a tensão à fase L1

Fase – Fase (L1)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	126,4	1,32	47,33
2	127	1,38	45,48
3	127	1,36	45,66
4	127	1,34	45,64
5	127	1,35	45,6
6	127	1,35	45,55
7	127	1,34	45,64
8	127	1,34	45,64
9	126,4	1,36	46,81
10	127	1,35	45,6
11	127	1,34	45,59
12	126,4	1,34	46,84
13	126,4	1,34	46,83
14	126,4	1,34	47,48
15	127	1,35	45,61

Tabela 5.6: Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade positiva quando se aplica a tensão à fase L2

Fase – Fase (L2)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	127	1,37	45,63
2	127	1,34	45,47
3	127	1,34	4,37
4	127	1,33	45,58
5	126,4	1,33	47,4
6	127	1,37	45,62
7	127	1,36	45,61
8	127	1,35	45,65
9	127	1,34	45,69
10	127	1,34	45,58
11	127	1,36	45,64
12	127	1,35	45,59
13	127	1,34	45,65
14	127	1,34	45,58
15	127	1,35	45,68

Tabela 5.7: Resultados obtidos no ensaio Fase-Fase polaridade positiva quando se aplica a tensão à fase L3

Fase – Fase (L3)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	127	1,39	45,64
2	127	1,35	45,54
3	127	1,35	45,55
4	127	1,37	45,57
5	127	1,35	45,61
6	126,4	1,36	47,44
7	127	1,34	45,68
8	127	1,37	45,57
9	127	1,35	45,55
10	126,4	1,33	46,64
11	127	1,36	45,57
12	127	1,36	45,63
13	127	1,34	45,58
14	127	1,34	45,72
15	127	1,34	45,59

as fases de entrada L2 e L3.

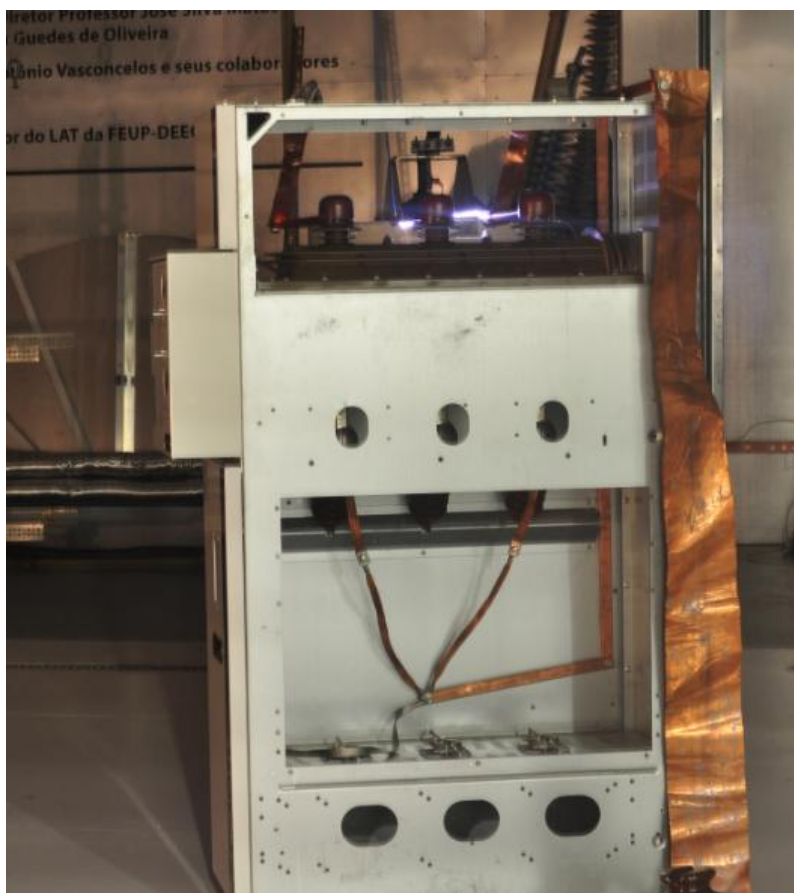


Figura 5.15: Arco elétrico entre a fase L2 e a fase L3

A imagem 5.16 na página 45 ilustra caso de ocorrência de uma descarga a onda de tensão que é cortada e decresce muito rapidamente para valores aproximadamente de zero. Numa descarga, observa-se que o tempo de cauda na onda de tensão é muito inferior ao tempo de cauda da onda normalizada. Designa-se por descarga quando o isolante, neste caso o ar, se torna condutor e o seu campo de rutura é ultrapassado. Seria mais rapidamente espectável que o ar se tornasse condutor do que o SF_6 , pois a rigidez dielétrica do ar é muito inferior à do SF_6 .

Para certificar que a rigidez dielétrica do ar não foi alterada deve confirmar-se que não existe uma descarga nos 5 impulsos consecutivos. Uma vez que não se verificou mais nenhuma descarga, conclui-se que o meio ar teve capacidade para regenerar a sua rigidez dielétrica. Isto significa que tanto a rigidez dielétrica do ar como a do SF_6 que se encontra entre as fases do aparelho de corte existente no equipamento em ensaio, estão em perfeitas condições.

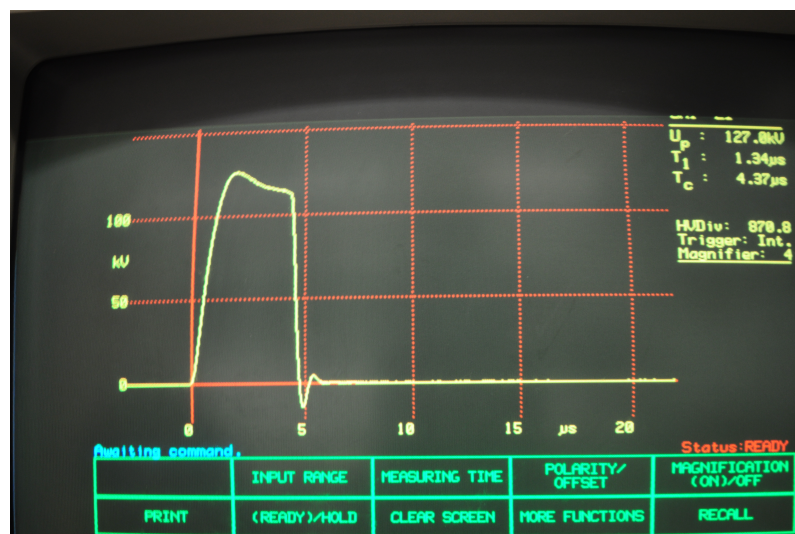


Figura 5.16: Registo da onda de tensão durante a descarga

A figura 5.17 na página 45 esquematiza o procedimento que deve ser efetuado para o ensaio Fase-Terra:

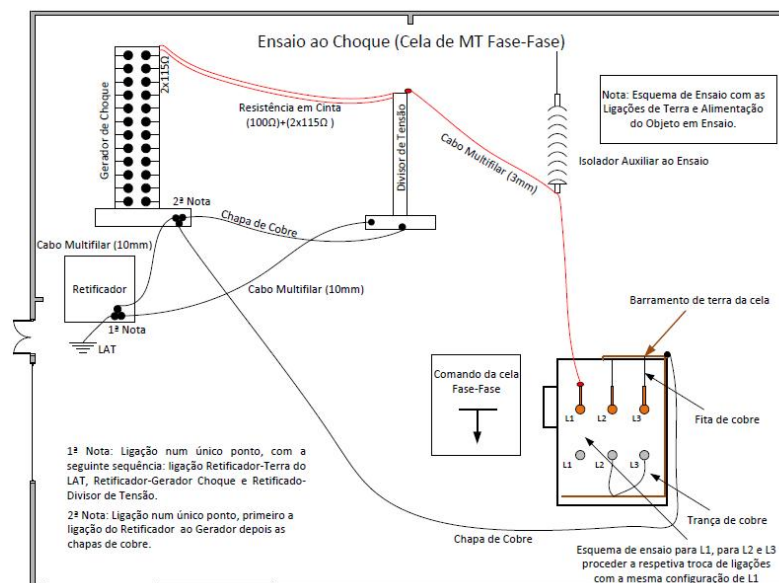


Figura 5.17: Procedimento para Ensaio Fase-Fase

5.2.2 Ensaios Fase-Terra

O objetivo deste ensaio é avaliar a rigidez dielétrica do ar e do SF_6 entre as fases do interruptor-seccionador e a terra. A configuração dos equipamentos é idêntica ao ensaio Fase-Fase, no entanto, neste ensaio o encravamento da cela deve estar na posição de ligado

à terra, conforme representado na figura 3.3. Para além do encravamento estar na posição “terra” as fases de saída da cela devem estar interligadas entre si ao barramento terra que a cela possui, como se observa o ponto 4 da tabela 4.2. Verifica-se através da figura 5.18 que ligações é que foram efetuadas para a realização deste ensaio.

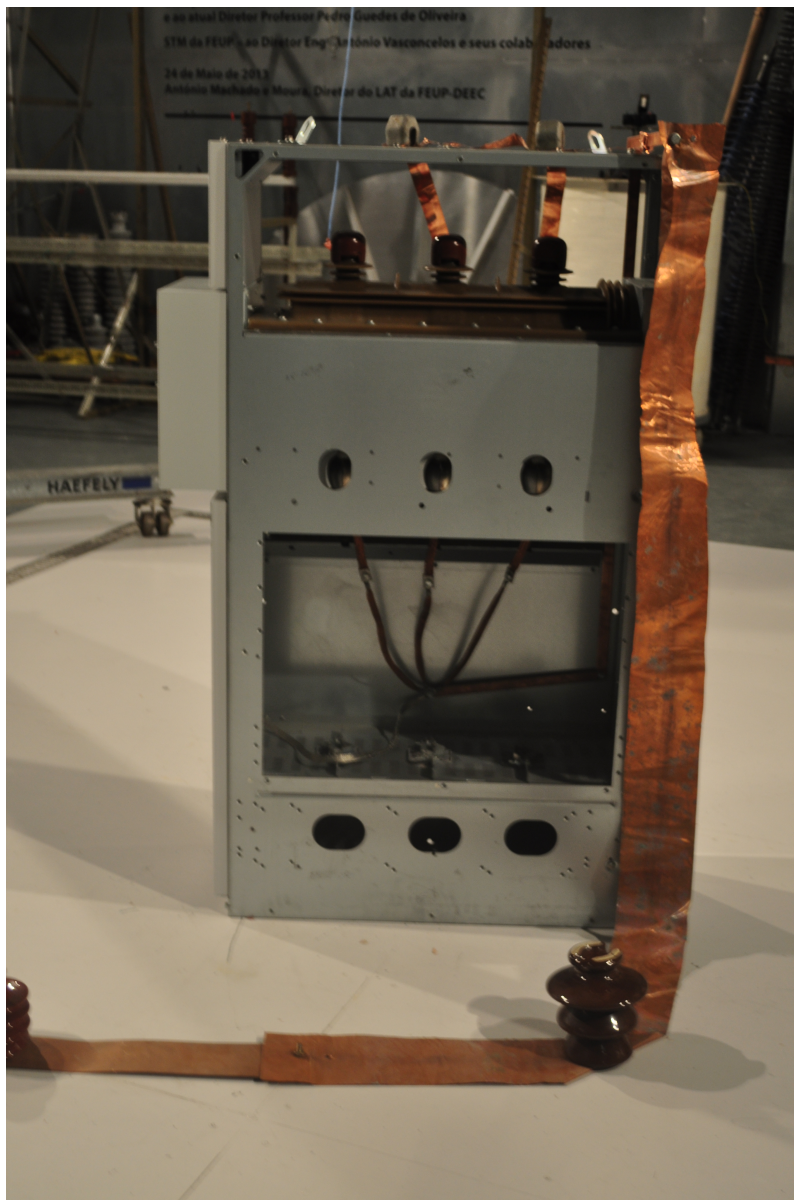


Figura 5.18: Representação ilustrativa das 3 fases de saída curto-circuitadas

Tal como foi efetuado para o ensaio Fase-Fase, foi registada uma onda completa de pré-ensaio, onde se obteve os seguintes valores:

- Tensão de pico (-128,4) kV;
- Tempo de frente (1,25) μs ;

- Tempo de cauda (45,16) μ s;

Para confirmar a rigidez dielétrica do ar e do SF_6 entre a Fase de entrada L1 e a terra, aplicou-se inicialmente a L1 uma tensão de 125kV com polaridade negativa. Tal como nos ensaios Fase – Fase, devem ser efetuados ensaios de 15 impulsos para certificar que os critérios necessários são cumpridos. Após a observação e o registo dos valores obtidos na aplicação de uma tensão negativa à fase L1 de entrada da cela, é indispensável reproduzir o mesmo procedimento, mas com a tensão aplicada à fase L2 de entrada. Posteriormente deve repetir-se o mesmo método para a tensão aplicada na fase de entrada L3.

As tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 representam os valores obtidos para o ensaio Fase-Terra com uma tensão negativa de 125kV.

Tabela 5.8: Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L1

Fase – Fase (L1)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	-128,4	1,26	45,57
2	-128,5	1,26	45,68
3	-128,4	1,26	45,77
4	-128,4	1,26	45,77
5	-128,2	1,26	45,73
6	-128,4	1,27	45,75
7	-128,4	1,24	45,22
8	-128,4	1,26	45,76
9	-128,4	1,26	45,84
10	-128,4	1,26	45,82
11	-128,4	1,25	45,62
12	-128,4	1,25	45,17
13	-128,4	1,25	45,21
14	-128,4	1,26	45,84
15	-128,4	1,24	45,23

Tal como efetuado no ensaio Fase – Fase, neste ensaio Fase-Terra é necessário verificar qual é a rigidez dielétrica dos meios isolantes entre as fases de entrada e a terra caso seja aplicada uma tensão positiva. É indispensável realizar o mesmo processo descrito acima. Aplicou-se novamente 15 impulsos a cada uma das fases, mas com a polaridade positiva.

As tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 demonstram os valores registados através do sistema DIAS.

Os valores obtidos neste ensaio Fase-Terra permitem de igual modo afirmar que não houve nenhuma descarga. Caso tivesse ocorrido uma descarga, esta poderia ter sido entre a fase

Tabela 5.9: Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L2

Fase – Fase (L2)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	-128,4	1,22	45,23
2	-128,5	1,27	45,24
3	-128,4	1,26	45,73
4	-128,4	1,27	45,74
5	-128,4	1,26	45,74
6	-128,4	1,23	45,23
7	-128,4	1,28	45,67
8	-128,4	1,27	45,87
9	-128,4	1,23	45,13
10	-128,4	1,23	45,18
11	-128,4	1,23	45,13
12	-128,4	1,27	45,72
13	-128,4	1,25	45,12
14	-128,4	1,25	45,15
15	-128,4	1,27	45,14

Tabela 5.10: Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L3

Fase – Fase (L3)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	-128,4	1,22	45,23
2	-128,5	1,27	45,24
3	-128,4	1,26	45,73
4	-128,4	1,27	45,74
5	-128,4	1,26	45,74
6	-128,4	1,23	45,23
7	-128,4	1,28	45,67
8	-128,4	1,27	45,87
9	-128,4	1,23	45,13
10	-128,4	1,23	45,18
11	-128,4	1,23	45,13
12	-128,4	1,27	45,72
13	-128,4	1,25	45,12
14	-128,4	1,25	45,15
15	-128,4	1,27	45,14

Tabela 5.11: Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L1

Fase – Fase (L1)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	127,7	1,27	46,36
2	127,7	1,3	46,31
3	127,7	1,26	46,33
4	127,7	1,26	46,42
5	127,7	1,27	46,32
6	127,7	1,27	46,42
7	127,7	1,26	46,33
8	127,7	1,27	46,35
9	127,7	1,27	46,36
10	127,7	1,29	46,28
11	127,7	1,27	46,36
12	127,7	1,27	46,33
13	127,7	1,26	46,48
14	127,7	1,28	46,38
15	127,7	1,27	46,41

Tabela 5.12: Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L2

Fase – Fase (L2)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	127,7	1,24	45,54
2	127,7	1,27	46,44
3	127,7	1,27	46,33
4	127,7	1,27	46,37
5	127,7	1,27	46,41
6	127,7	1,27	46,34
7	127,7	1,29	46,35
8	127,7	1,27	46,4
9	127,7	1,27	46,37
10	127,7	1,27	46,34
11	127,7	1,26	46,41
12	127,7	1,27	46,37
13	127,7	1,26	46,41
14	127,7	1,25	46,45
15	127,7	1,27	46,36

Tabela 5.13: Resultados obtidos no ensaio Fase-Terra polaridade negativa quando se aplica a tensão à fase L3

Fase – Fase (L3)			
Impulso	Tensão de pico	Tempo de frente	Tempo de cauda
1	127,7	1,28	46,32
2	127,7	1,28	46,33
3	127,7	1,26	46,36
4	127,7	1,27	46,41
5	127,7	1,27	46,38
6	127,7	1,27	46,41
7	127,7	1,29	46,4
8	127,7	1,27	46,41
9	127,7	1,26	46,41
10	127,7	1,26	46,44
11	127,7	1,29	46,43
12	127,7	1,29	46,45
13	127,7	1,27	46,42
14	127,7	1,26	46,38
15	127,7	1,28	46,04

de entrada e a fase de saída (terra) ou entre a fase de entrada e o invólucro metálico. Caso se verificasse um arco elétrico teria sido o ar a conduzir, ou seja, a ceder em termos da rigidez dielétrica. Apenas os equipamentos de monitorização, neste caso o sistema DIAS, é que permitiriam registar os valores e a forma de onda para uma descarga sucedida em SF_6 . Nesta situação como se compreende, não seria possível visualizar o arco elétrico.

A figura 5.19 na página 51 esquematiza o procedimento que deve ser efetuado para o ensaio Fase-Fase:

5.3 Ensaaios à frequência industrial

Para certificar o comportamento dielétrico da cela de modo a proteger os equipamentos da rede em casos normais de serviço, interligou-se o equipamento de ensaio com o transformador de 600kV, com o divisor de tensão com uma potência máxima de 23 kVA e ao isolador auxiliar de ensaio. A descrição detalhada de cada um destes equipamentos pode ser analisada nos anexos A deste documento. A figura 5.20 ilustra o circuito que foi efetuado para certificar as condições da rigidez dielétrica do ar e do meio isolante SF_6 no ensaio à frequência industrial.

A alimentação do transformador é realizada através de um regulador situado na sala de comando do LAT, cujo funcionamento é idêntico ao de um autotransformador. Na sala de

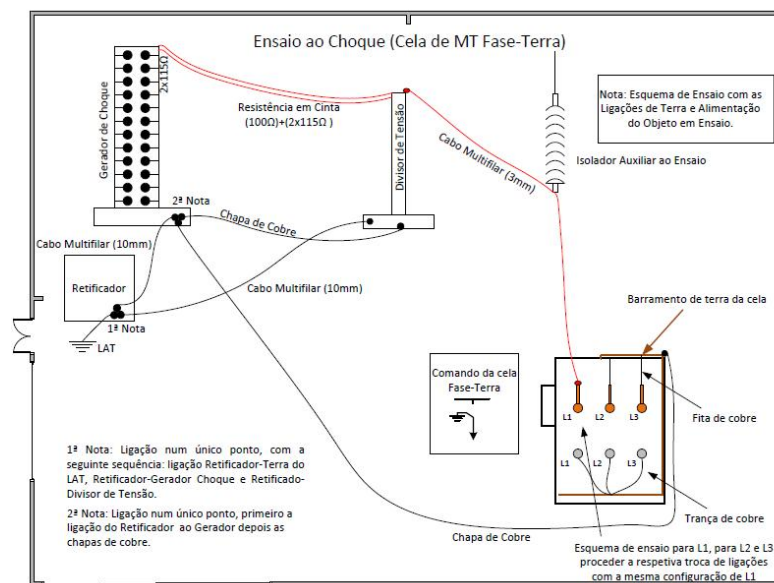


Figura 5.19: Procedimento para Ensaio Fase-Terra



Figura 5.20: Fotografia que ilustra o circuito efetuado para os ensaios à frequência industrial

operação existe um controlador que possibilita ao operador dar as instruções para manobrar o regulador.

O procedimento para a realização deste ensaio é idêntico ao aplicado ao ensaio da onda choque, ou seja, foi realizado um ensaio Fase-Fase e um ensaio Fase-Terra, onde as ligações das fases serão idênticas. Contudo, neste ensaio para confirmar se o interruptor-seccionador apresenta a rigidez dielétrica suficiente, a cela será submetida a uma tensão alternada de 50kV, durante um minuto. Uma vez que neste ensaio se pretende avaliar o comportamento

dielétrico do equipamento em ensaio em situações de uma onda sinusoidal, não será necessário efetuar testes à polaridade como no ensaio à onda choque.

5.3.1 Ensaios Fase-Fase

Aplica-se a uma das fases uma tensão de 50kV, um valor aproximadamente igual ao dobro da tensão nominal do equipamento de ensaio. No caso de ocorrer uma descarga devido a uma sobretensão na rede, este ensaio permite simular o comportamento dielétrico da cela esperado numa situação real. Com este ensaio pretende-se avaliar se o ar e o meio isolador SF_6 entre as fases apresentam as capacidades dielétricas suficientes para certificar a cela para situações de sobrecarga. Este valor é estabelecido pela norma IEC 62271-1 como sendo o valor de tensão a aplicar num ensaio à frequência industrial. Para a execução deste ensaio, o encravamento da cela deve estar na posição de fechado. À fase de entrada L1 interruptor – seccionador deve ser aplicada uma tensão alternada de 50kV, onde existe passagem de tensão entre a fase L1 de entrada e a fase I1 de saída, e as restantes L2 e L3 de entrada e saída devem estar ligadas à terra.

De forma a averiguar a rigidez dielétrica do ar e do SF_6 , o equipamento em ensaio deve ser submetido a esta tensão durante um minuto. Após a realização do ensaio à fase L1, deverá ser de igual modo injetada uma tensão de 50kV à fase L2 de entrada, com as fases L1 e L3 ligadas à terra. Posteriormente, deve ser analisado também o comportamento da rigidez dielétrica do interruptor-seccionador quando a tensão é aplicada à fase L3 e as restantes são curto-circuitadas (L2 e L1).

Durante o ensaio não se verificou nenhuma descarga, o que significa que tanto a rigidez dielétrica do ar como do SF_6 apresentam as condições necessárias para suportar uma tensão superior à nominal. No caso de ocorrer uma descarga, e o arco ser visível seria a rigidez do ar que tinha perdido a sua rigidez dielétrica e tinha permitido que o arco fosse estabelecido. Este arco poderia ser entre uma das fases de entrada e uma das restantes fases de entrada.

A figura 5.21 na página 53 esquematiza o procedimento que deve ser efetuado para o ensaio Fase-Terra:

5.3.2 Ensaios Fase-Terra

Com este ensaio pretende-se avaliar se a rigidez dielétrica entre fase e a terra é garantida em caso de sobretensão. De forma a verificar a rigidez entre fase-terra, o encravamento da cela deve estar ligado à terra e as fases de saída do interruptor-seccionador devem estar curto-circuitadas entre elas. Interliga-se o divisor de tensão com a fase de entrada L1 e

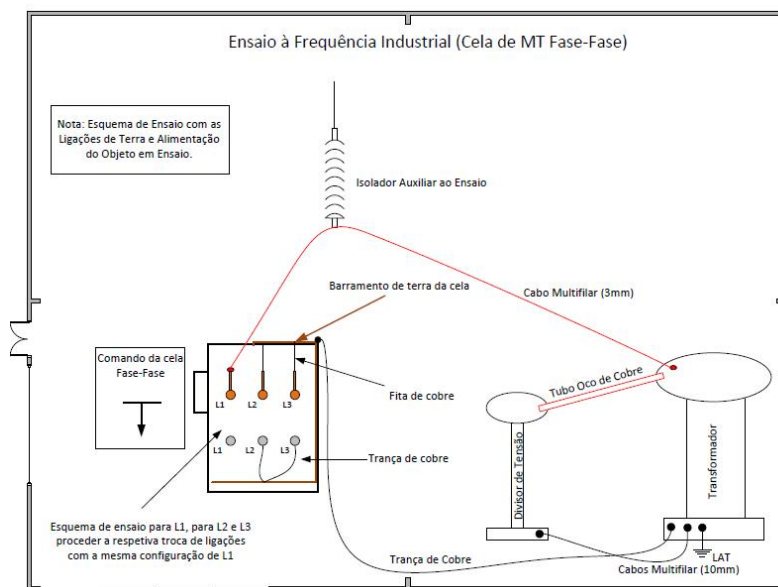


Figura 5.21: Procedimento para Ensaio à Frequência Industrial Fase-Fase

aplica-se uma tensão de 50kV, sendo que as restantes fases L2 e L3 estão curto-circuitadas. Verifica-se durante um minuto que não houve nenhuma descarga disruptiva. É necessário repetir o mesmo procedimento para as fases L2 e L3 para certificar que não ocorre nenhuma descarga entre fases e terra.

Não tendo ocorrido qualquer descarga nos ensaios à frequência industrial, conclui-se que a rigidez dielétrica do interruptor-seccionador entre Fase-Terra possui as capacidades necessárias para suportar uma sobretensão.

A figura 5.22 na página 54 esquematiza o procedimento que deve ser efetuado para o ensaio Fase-Terra.

5.4 Correção dos valores atmosféricos

Tal como já foi referido anteriormente, para a realização de ensaios dielétricos é extremamente importante analisar as condições atmosféricas existentes na altura desses ensaios. Desta forma, ao longo deste trabalho experimental foram registadas, sempre que possível, a temperatura, a humidade relativa e a pressão atmosférica. Uma vez que as normas descrevem como sendo necessário registar a humidade absoluta e no LAT só é possível medir a humidade relativa, esta teve que ser convertida para humidade absoluta, através da fórmula

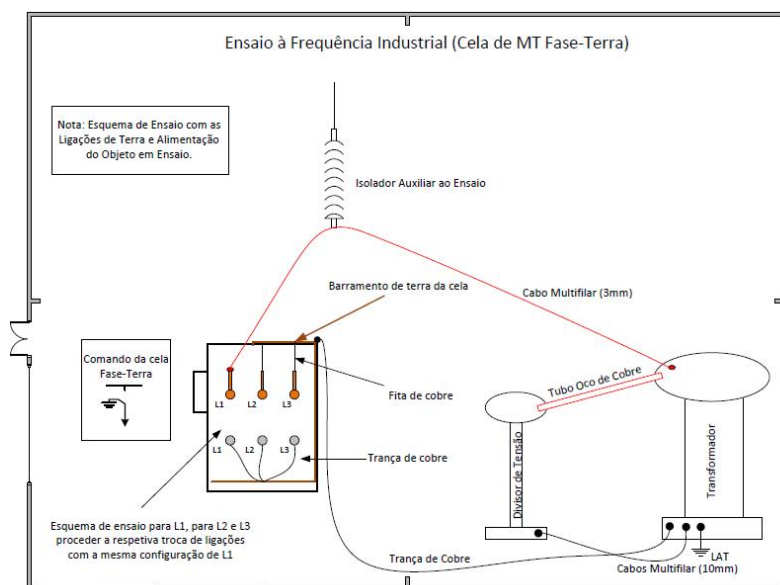


Figura 5.22: Procedimento para Ensaio à Frequência Industrial Fase-Fase

5.1

$$h = \frac{6,11 \times h_r \times e^{\frac{17,6 \times t}{243+t}}}{0,4615 \times (273 + t)} \quad (5.1)$$

onde:

h_r é igual à humidade relativa;

t é igual à temperatura média medida durante os ensaios;

A variação das condições atmosféricas ao longo dos ensaios não foi significativa. Como tal, para os ensaios à onda choque será efetuado os cálculos com base na média dos valores obtidos. Os seguintes valores representam os valores médios das condições atmosféricas registadas no decorrer dos ensaios à onda choque:

- Temperatura média = $12,96^\circ\text{C}$;
- Humidade absoluta média = $5,421\text{g}/\text{m}^3$;
- Pressão média = 992hPa

Através destes dados foi possível efetuar os cálculos necessários para determinar o valor da tensão corrigida às condições atmosféricas, conforme descrito no capítulo 4. Como a humidade absoluta é inferior a $11\text{g}/\text{m}^3$ e a tensão nominal do equipamento em ensaio é

inferior a 52 kV, assume-se os seguintes dados $m = 1$ e $w = 1$ para o cálculo da tensão. A tensão corrigida às condições atmosféricas para o ensaio à onda de choque é de 131,96kV.

Para o ensaio à frequência industrial, cuja tensão corrigida é de 52,98kV, registaram-se os seguintes valores médios das condições atmosféricas:

- Temperatura média = $13,4^{\circ}C$;
- Humidade absoluta média = $5,35g/m^3$;
- Pressão média = $990hPa$

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Esta dissertação teve como principal objetivo avaliar se o comportamento dielétrico de uma cela de 24kV, disponibilizada pela EFACEC, apresenta as condições necessárias para desempenhar corretamente as funções para as quais foi projetada. Ao longo deste trabalho, foram efetuados um conjunto de ensaios para averiguar qual seria o comportamento dielétrico do equipamento de ensaio em situações idênticas a uma descarga atmosférica ou em casos de sobretensão na rede a uma frequência industrial. Estes ensaios foram efetuados em concordância com as normas estabelecidas pelo IEC, que descrevem quais são os critérios necessários para certificar que o comportamento dielétrico da cela está em conformidade com as suas especificações.

Foi feito um estudo da evolução tecnológica das celas ao longo das últimas décadas. Explorou-se também os aspetos construtivos das celas mais relevantes para a sua aplicação, e a oferta comercial da EFACEC.

De forma a averiguar qual seria o comportamento dielétrico do equipamento de ensaio em situações idênticas a uma descarga atmosférica, este foi submetido a ensaios à onda de choque com uma onda de impulso de $(1,2/50)\mu s$. Neste ensaio ocorreu uma descarga, mas conclui-se que a rigidez dielétrica do ar não ficou comprometida após o contornamento entre a fase de entrada L2 e L3, pois nos 5 impulsos consecutivos posteriores não se verificou mais nenhuma descarga. Caso tivesse sido registado uma forma de onda cortada e o arco não tivesse sido visível poderíamos concluir que tinha ocorrido uma descarga no meio isolador SF6 existente no interruptor-seccionador da cela. Com o ensaio à onda de choque certifica-se que a cela terá o comportamento dielétrico necessário para suportar uma típica descarga atmosférica na rede elétrica de energia.

No decorrer do ensaio à frequência industrial que simula uma situação real de serviço, não se verificou nenhuma descarga. Deste modo, concluiu-se que a cela apresenta o comportamento dielétrico para a qual foi dimensionada para suportar situações de sobretensões na rede.

Ao longo desta dissertação foram incluídos os esquemas necessários e as ligações que devem ser efetuadas para a realização de ensaios tipo para averiguar o comportamento dielétrico de uma cela. Foram descritas quais as informações que são indispensáveis incluir nos relatórios no decorrer da realização de um ensaio tipo, e sendo o LAT uma entidade externa poderá futuramente com este conhecimento ficar apto para apoiar os fabricantes a certificar a qualidade dos seus novos produtos. Após esta dissertação o LAT desenvolverá e melhorará as suas competências no procedimento a ensaios dielétricos a uma cela de média tensão.

6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, sugere-se que o LAT aplique os conhecimentos desenvolvidos nesta dissertação para averiguar se a cela suporta um valor superior ao valor nominal para a qual está dimensionada. Isto permite verificar se este tipo de equipamento poderá ser alvo de um processo otimização em termos do seu dimensionamento dielétrico. Recomenda-se também como trabalho futuro o LAT adquirir um sistema de monitorização de temperatura adequada para conjuntamente com estes ensaios desenvolver as competências na realização de ensaios de aquecimento.

Referências

- [1] G. G. Seip, *Electrical Installations Handbook, Vol 1-Power-Supply and Distribution Systems*. Siemens, John Wiley and Sons, 2th edition, 1987.
- [2] R. Brito, “Análise dielétrica de celas de média tensão,” 2014.
- [3] B. A. Elektrizitäts-Gesellschaft, *AEG-Hilfsbuch für elektrische Licht- und Kraftanlagen*. Girardet, 1956.
- [4] O. Guthmann and B. A. B. B. . Cie, *Switchgear Manual*. Brown, Boveri u. Cie., 1978.
- [5] G. E. Karla Trost, “The evolution of switchgear dielectric technology,” 2015.
- [6] M. Hyrenbach and S. Zache, “Alternative insulation gas for medium-voltage switchgear,” in *Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe)*, 2016, pp. 1–9, IEEE, 2016.
- [7] L. Falkingham and G. Montillet, “A history of fifty years of vacuum interrupter development-(the english connection),” in *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, pp. 706–711, IEEE, 2004.
- [8] ABB, “Switchgear - Medium voltage.”
- [9] R. Nagarsheth and S. Singh, “Study of gas insulated substation and its comparison with air insulated substation,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 55, pp. 481–485, 2014.
- [10] Siemens, “Medium voltage systems.”
- [11] T. Wen, Q. Zhang, Y. Qin, J. Zhao, J. Ma, Z. Wu, N. Shimomura, F. Tao, Y. Jia, Y. Yin, *et al.*, “On-site standard lightning impulse test for 1,100-kV gas-insulated switchgear with large capacitance,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 32, no. 6, pp. 36–43, 2016.
- [12] H. Gastón, V. Venegas, and E. Melgoza, “Diseño y simulación de una red de tierras para una subestación tipo gis,” *IEEE Latin América Transactions*, vol. 6, no. 2, pp. 137–140, 2008.
- [13] ABB, “Distribution evolution,” 2015.
- [14] Schneider, “Electrical-installation-guide-2013,” 2017.
- [15] IsoSigma, “Celas modulares ME6 de corte em SF_6 de 24kV.”

- [16] J. T. Montecelos, *Maniobra y Protección de las Instalaciones Eléctricas, Vol VI-Centros de Transformación*. Creaciones Copyright, S.L., 2009.
- [17] P. J. R. Ferreira, “Principais tipos de disjuntores.”
- [18] C. U. S. D. S. P. C. RICHARD ROBERTO CAIRES, “Equipamentos de alta tensão.”
- [19] FEUP, “Hexafluoreto de enxofre (SF₆).”
- [20] F. M. S. Horta, “Desenvolvimento e otimização de seccionadores em redes MT,” 2014.
- [21] EFACEC, “Normafix modular distribution switchgear - instructions,” 2015.
- [22] L. Martins, “Apontamentos para projecto de instalações elétricas II.”
- [23] EFACEC, “Aparelhagem de alta e média tensão - Efacec,” 2016.
- [24] “IEC, “High-voltage test techniques – part 1: General definitions and test requirements”,3^oed.,” standard, International Electrotechnical Commission, 2010.
- [25] “IEC, “High-voltage test techniques – part 2: Measuring systems”,3^oed.,” standard, International Electrotechnical Commission, Nov. 2010.
- [26] “IEC, “High-voltage switchgear and controlgear - common specifications”,1^oed.,” standard, International Electrotechnical Commission, 2007.
- [27] “IEC, “High-voltage switchgear and controlgear - part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV”,2^oed.,” standard, International Electrotechnical Commission, 2011.

Anexo A

Anexos

Os ensaios referentes à realização deste trabalho foram efetuados no Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LAT/FEUP). Este LAT possui um hall de ensaios com uma área de 147m², com aproximadamente 11 metros de pé direito para disposição dos equipamentos. Possui também, uma sala de comando com acesso à sala principal (hall), onde se encontram os equipamentos de medição e controlo para os sistemas presentes na sala de ensaio e uma sala de observação colocada diretamente acima da de comando, com uma boa visão sobre os equipamentos.

Os equipamentos existentes no LAT apresentam as características necessárias para a realização dos ensaios à onda de choque, atmosférico e de manobra, e à frequência industrial. A tabela A.1 descreve quais os equipamentos utilizados em cada um dos ensaios.

Tabela A.1: Designação dos equipamentos utilizados em cada um dos ensaios

Ensaio à onda de choque	Ensaio à Frequência Industrial
Gerador de Marx do tipo SGS 1200kV/36kJ com 12 andares	Transformador de Alta Tensão 600kV
Retificador de carregamento tipo LGR 100-15	Regulador Elevador
Divisor de tensão de impulso tipo CR 1200 kV	Divisor de Tensão CW 600
Módulo de controlo GC222	Unidade de controlo e medida
Sistema DIAS (Digital Impulse Analyser System) 730	

A.1 Ensaios à Onda de Choque

Retificador de carregamento tipo LGR 100-15 Este dispositivo é indispensável para a montagem do circuito para a execução dos ensaios à onda choque. Uma das fases deste equipamento é alimentada por uma tensão a 230V, a uma frequência de 50Hz e é protegida por um fusível existente num dos terminais do laboratório. De forma a executar ensaios de

polaridade, o retificador possui uma ponte de díodos onde permite ao operador inverter para positivo ou negativo, o valor da tensão. Uma vez que a alimentação é efetuada a uma de 230V e os ensaios são realizados a 125kV, o retificador possui conjuntamente interligado com a ponte de díodos um transformador que permite elevar a tensão. Este equipamento já tem incorporado em si uma resistência de 8,4kohm, que permite efetuar o carregamento do primeiro condensador do gerador de impulso, pois a estrutura do gerador de impulso não permite adicionar no primeiro andar uma resistência de carga (Figura A.1 na página 62).

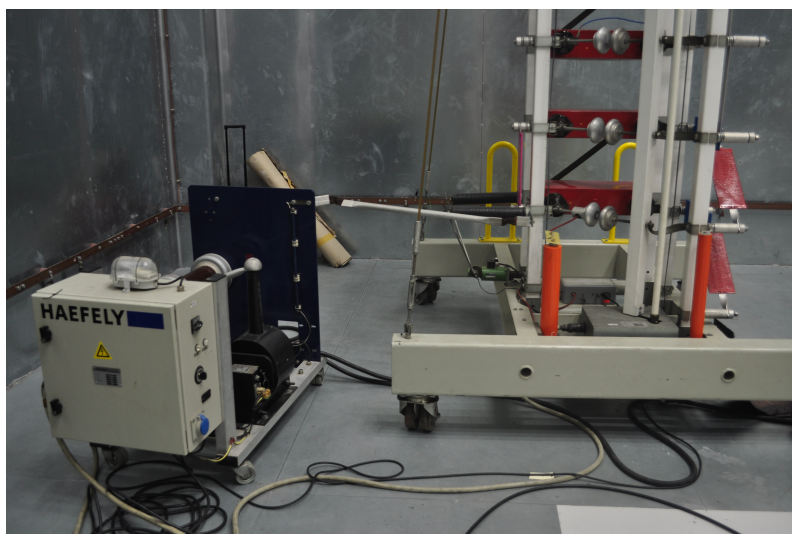


Figura A.1: Ilustração do Retificador LGR 100-15 em ligação com o Gerador de Marx

Gerador de Marx do tipo SGS 1200kV/36kJ A constituição física deste equipamento pode ser observada através da figura A.2 na página 63, onde é composta por 12 andares. O gerador de impulsos existente no LAT é da marca Haefely que permite acumular uma tensão máxima de 100kV por andar, o que perfaz na sua totalidade uma tensão máxima de 1200kV. Este gerador é recomendado para ensaios a diversas gamas de tensões pois permite gerar tensões de impulso que simulam descargas atmosféricas ou sobretensões de manobra. Este gerador de impulsos é viável e preciso, porque é baseado nos circuitos multiplicadores de Ervin Marx, o que significa que os condensadores são carregados em paralelo e descarregados em série. Os condensadores estão posicionados em paralelo, em cada um dos andares do gerador, com uma capacidade de $1,2\mu F$. O gerador de Marx permite que lhe sejam adicionadas resistências o que possibilita controlar a forma de onda tensão de impulso.

Divisor de tensão de impulso – CR1200kV O divisor de tensão representado na figura A.3 na página 64 possibilita consoante as suas características ser interligado à saída do gera-

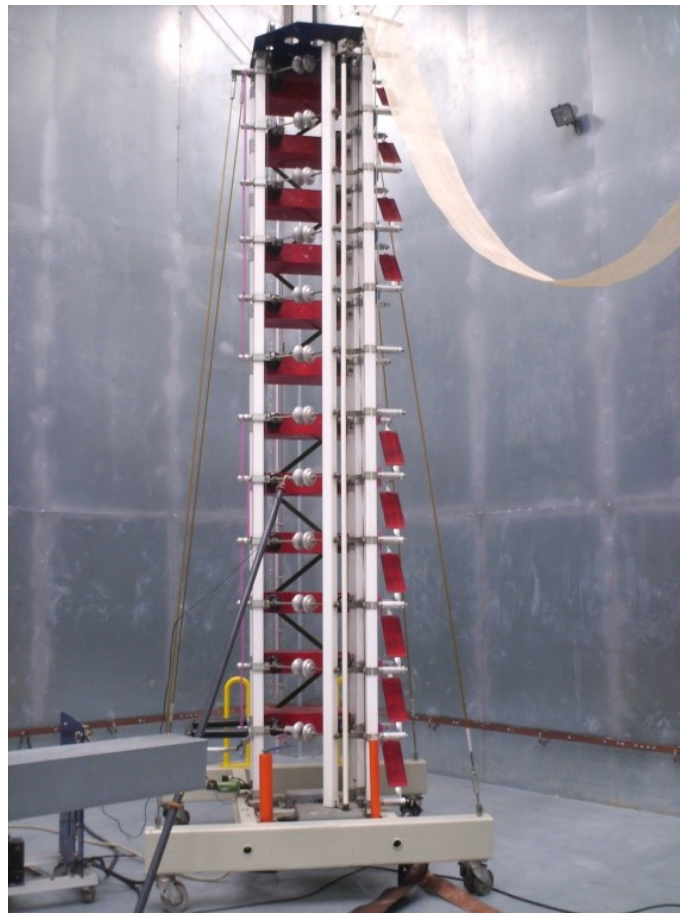


Figura A.2: Ilustração do Gerador de choque de Marx

dor de Marx e ao equipamento em ensaio. É constituído por vários condensadores em série, onde o somatório das suas capacidades perfaz os $1200pF$ e por uma resistência de amortecimento de 100 ohm na parte superior do divisor de tensão. É através deste equipamento que a onda de choque produzida pelo gerador será transformada num sinal passível de ser registado pelo sistema DIAS.

Unidade de controlo GC222 A unidade de controlo existente na sala de comando, ilustrado na figura A.4 na página 65, permite ao operador determinar o tempo de carregamento dos condensadores e a tensão aplicada que será acumulada em cada um deles. Possibilita também definir as distâncias das esferas localizadas no gerador de impulso, a polaridade da onda a aplicar ao equipamento de ensaio e estabelecer se o disparo será automático ou manual.

Digital Impulse Analyser System 730 De forma a ser possível registar os valores obtidos durante os ensaios à onda choque, a unidade de processamento de sinal deve estar interli-

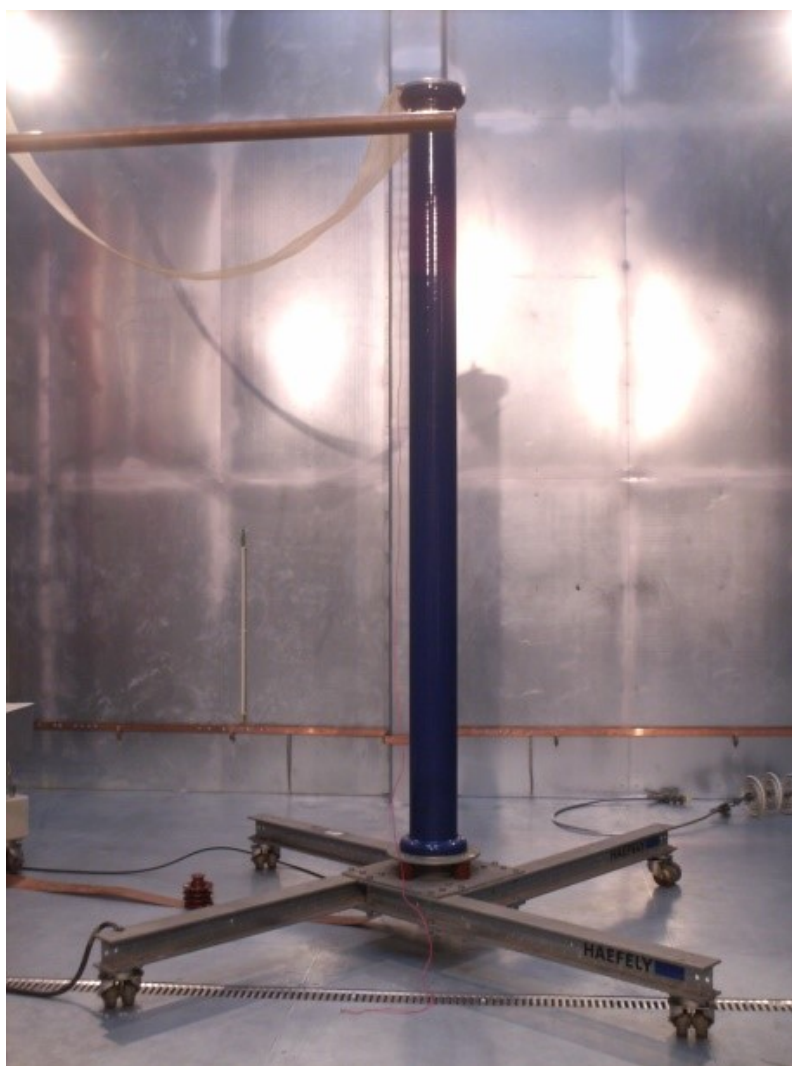


Figura A.3: Ilustração do Divisor de tensão de impulso – CR1200kV:

gada com o divisor de tensão, acima descrito. Esta unidade é designada por Digital Impulse Analyser System que tem como acrónimo DIAS (Figura A.4 na página 65). É através desta unidade de sinal que o operador obtém a representação gráfica da forma de onda bem como o valor de pico da tensão aplicada ao equipamento de ensaio. Os valores do tempo de frente e do tempo de cauda são de igual modo demonstrados no processamento de sinal.

A.2 Ensaios à Frequência Industrial

Transformador de Alta Tensão 600kV Os equipamentos destinados à realização de ensaios à frequência industrial caracterizam-se por elevadas razões de transformação, e intensidades baixas à saída de alta tensão com elevada resistência a curto-circuitos. O transfor-



Figura A.4: Fotografia da unidade de controlo GC222 (lado esquerdo) e do sistema DIAS (lado direito da imagem)

mador de alta tensão que o LAT possui, representado na figura [A.5](#) na página [66](#), é composto por dois módulos em cascata ($2 \times 300 \text{ kV}$) o que confere no total uma tensão máxima de 600 kV . Esta configuração permite ainda, em caso de necessidade, utilizar apenas um dos módulos. O conjunto dos dois módulos permite alcançar uma potência máxima de 300 kVA , assim como uma intensidade de corrente de $0,5 \text{ A}$ para a tensão máxima gerada pelo conjunto.

Divisor de Tensão CW 600 O divisor de tensão representado na figura [A.6](#) na página [A.6](#), permite reduzir a amplitude da tensão produzida pelo transformador possibilitando a sua medição e proporcionando uma maior segurança aos operadores. O divisor de tensão apresenta uma potência máxima de 23 kVA , quando sujeito a tensão máxima do transformador de 600 kV a uma frequência de 50 Hz , possuindo ainda uma capacidade interna dos seus condensadores de $500 \text{ pF} \pm 10\%$.



Figura A.5: Fotografia do transformador de Alta Tensão 600kV

Regulador Elevador O regulador elevador da figura [A.7](#) na página [68](#), é o equipamento responsável pela alimentação do transformador e o seu funcionamento é bastante semelhante ao de um autotransformador, com tensão ajustável através de comandos elétricos por parte da unidade de controlo e medida. Possui dispositivos de corte e contactores que atracam quando é dada a ordem de ligar a alta tensão.

Unidade de controlo e medida A unidade de controlo e medida representada na figura [A.8](#) na página [68](#), permite determinar a tensão a aplicar ao objeto de ensaio num processo ascendente e de velocidade determinada pelo operador. A amplitude da tensão de saída do transformador é controlada por dois interruptores, um de subida e outro de descida. Além disso permite determinar a velocidade de subida/descida da tensão aplicada ao objeto em ensaio.



Figura A.6: Fotografia do Divisor de Tensão CW 600



Figura A.7: Fotografia do Regulador Elevador

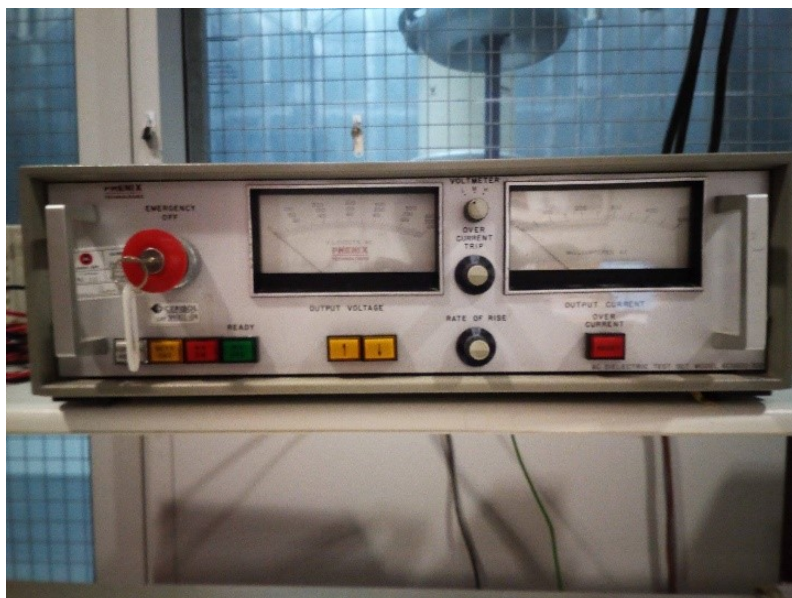


Figura A.8: Fotografia da unidade de controlo e medida